INVESTIGACION y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

EVOLUCION DEL CAMPO MAGNETICO TERRESTRE

FISICA DEL BOTAFUMEIRO

DESARROLLO DE LAS SINAPSIS DEL CEREBRO



AVES DEL PARAISO

FEBRERO 1990
500 PTAS.

INVESTIGACION Y
CIENCIA

Febrero de 1990 Número 161

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Mª Luisa Osete: *La evolución del campo magnético terrestre*; Ana García: *Formación de sinapsis durante el desarrollo del cerebro*; Luis Bou: *Las primeras fotografías en color* y *Juegos de ordenador*; Amando García: *Microagregados*; Joandomènec Ros: *Las aves del paraíso*; Juan Pedro Adrados: *Teleoperadores*; José Manuel García de la Mora: *Los misterios mitraicos*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Ciencia y sociedad:

Manuel Ocaña, Esther Boix y Luis Bou

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

Libros:

Antonio Prevosti, Luis Alonso, Elio García-Austt y Luis Mas

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-8	Pablo Sanmartín Fenollera
9-10	Fco. Huerta y Magda Mària
11	I.N.T.A.
12	Fco. Huerta y Magda Mària
13	P. Sanmartín. Biblioteca de la Catedral de Santiago
14	Fco. Huerta y Magda Mària
15	P. Sanmartín. Biblioteca de la Catedral de Santiago
16-17	Fco. Huerta y Magda Mària
18	Ian Worpole
19	J. Bloxham y D. Gubbins
20-21	Ian Worpole
22	Jeremy Bloxham y D. Gubbins
23-25	Ian Worpole
27	Ronald E. Kalil (*arriba*), Dana Burns (*abajo*)
28-30	Dana Burns
31	Ronald E. Kalil
32-33	Dana Burns
44-45	Museo Internacional de Fotografía George Eastman House, Rochester, N. Y.
46	Museo de la Ciencia de Londres (*arriba*), Museo I. de Fotografía G. Eastman H. (*abajo*)
47	M. I. F. G. Eastman H. (*arriba*), Andrew Christie (*abajo*)
48	M. I. F. G. Eastman H.
49	Andrew Christie
50	M. I. F. G. Eastman H. (*arriba y abajo, dcha.*), Andrew Christie (*abajo, izq.*)
51	M. I. F. G. Eastman H. (*arriba*), Andrew Christie (*abajo*)
52	M. I. F. G. Eastman H.
55-59	Hank Iken
62	Bruce M. Beehler
64-65	Patricia J. Wynne
66	D. Gillison, P. Arnold, Inc. (*izq.*), B. M. Beehler (*dcha.*)
67	G. Ziesier, P. Arnold, Inc.
68	Patricia J. Wynne
69	Bruce M. Beehler
71	Charles T. Peterson, C. de Sistemas Navales Oceánicos
72	Andrew Christie (*arriba*), Charles T. Peterson (*abajo*)
73-79	Charles T. Peterson
77	Museo Wiesbaden
78-80	George V. Kelvin
81	L. H. Martin, U. de Vermont
82-85	Michael Goodman
87	Andrew Christie
88	Edward Bell
89	Russell Ruthen



LA PORTADA ilustra el dimorfismo sexual en el ave del paraíso de Raggi, una especie endémica de las pluviselvas de Nueva Guinea (véase "Las aves del paraíso", de Bruce M. Beehler, en este número). Durante el cortejo, el macho se desenvuelve con espectacularidad. Se posa en una rama, por encima de la hembra, doblándose de forma que su cabeza se halle completamente invertida y las alas extendidas hacia delante; sus plumas nupciales, de un naranja brillante, se hallan del todo expuestas a la hembra, de plumaje deslustrado, que lo observa desde abajo.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48 Telefax 419 47 82

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Armand Schwab, Jr., *Managing Editor*; Timothy Appenzeller, Laurie Burnham, *Associate Editors*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; John Horgan; June Kinoshita; Philip Morrison, *Book Editor*; John Rennie; Philip E. Ros; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Paul Wallich; Karen Wright
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Georg-Dieter von Holtzbrinck
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	5500	10.000
Extranjero	6200	11.500

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 500 pesetas
Extraordinario: 650 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel.652 42 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Teléfonos 409 70 45 - 409 70 46

Cataluña:
Prensa Científica, S.A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona
Tels. 321 81 91 - 321 83 48



ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Tecfa, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de la Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

José M.ª López Piñero

...cincuenta años

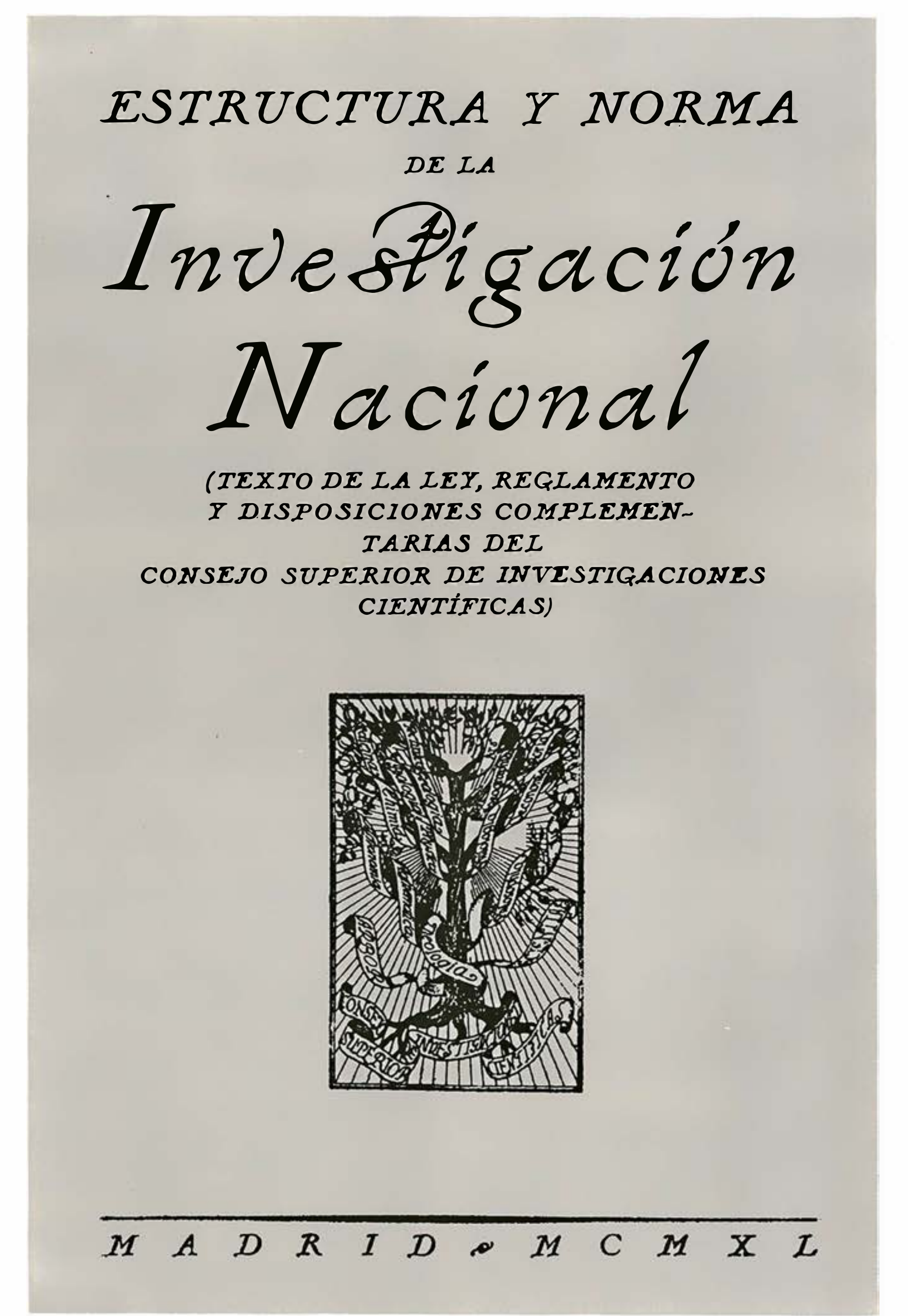
Se publicó el volumen titulado *Estructura y Norma de la Investigación Nacional*, que incluye la ley de 24 de noviembre de 1939 que creó el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, el reglamento de 10 de febrero de 1940 que determinó su funcionamiento y varias disposiciones complementarias sobre la misma institución.

El presupuesto básico de la fundación del Consejo fue la disolución de la Junta para Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas. Lejos de plantearse como una continuación o siquiera como una reforma de la Junta, se destacó la ruptura con ella desde varios puntos de vista. Uno de ellos fue la propia concepción del saber científico, ya que, como vamos a ver, se propuso como cimiento "la restauración de la clásica y cristiana unidad de las ciencias, destruída en el siglo XVIII" y la promoción del "árbol total de la ciencia". A ello se debió la adopción como "emblema" de un *arbor scientiae*, "que represente un granado, en cuyas diversas ramas se aluda en lengua latina a las manifestaciones científicas que el Consejo cultiva... siguiendo y adaptando la tradición luliana".

Por otra parte, la adhesión de la mayoría de las figuras científicas de la Junta a la República condujo también a la ruptura de sus escuelas y líneas de investigación. El exilio de muchas de ellas y las consecuencias que tuvo son hechos que no necesitan ser recordados. En cambio, parece conveniente anotar que la citada ruptura se produjo incluso cuando permanecieron en España personalidades científicas de ideología liberal. El caso más significativo fue el de la escuela de Cajal, que no tuvo continuidad a pesar de la presencia de Jorge Francisco Tello y Fernando de Castro, sus más importantes discípulos directos. A este respecto resulta muy ilustrativo que José Ibáñez Martín, Ministro de Educación Nacional del nuevo régimen, respondiera a los que expresaron su preocupación por la desaparición de tal escuela que la cuestión carecía de importancia y que era preferible formar investigadores más "modernos", enviándolos a centros alemanes.

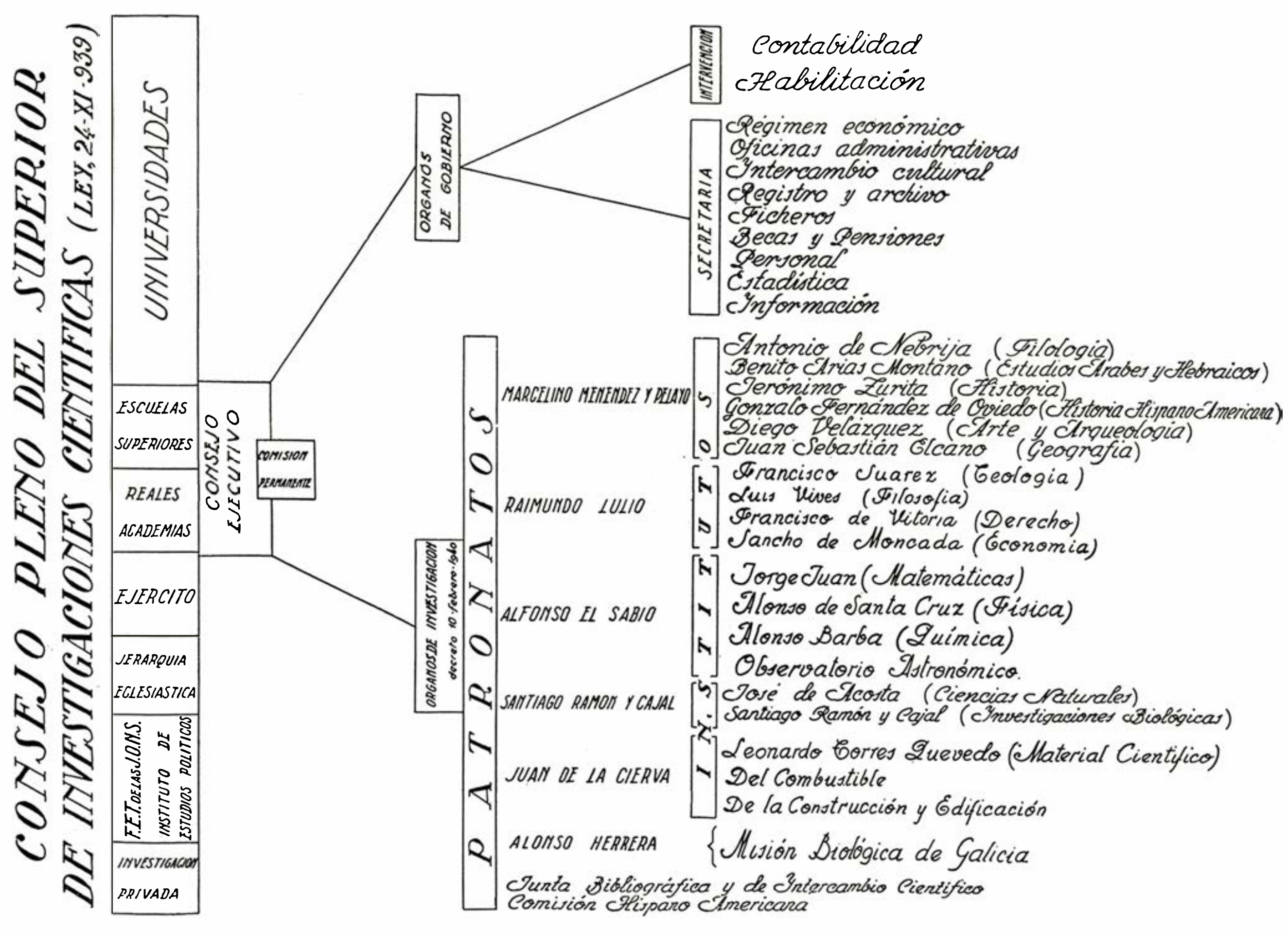
La ignorancia del peso determinante de la tradición científica y del papel decisivo que desempeñan las auténticas escuelas en la actividad investigadora y docente no fue privativa, por desgracia, de las autoridades académicas de aquel momento histórico.

Por el contrario, ha sido una actitud que ha aparecido de forma casi constante en épocas anteriores de nuestra trayectoria científica y que se continúa manteniendo en la actualidad. Basta citar un ejemplo destacado: recientemente, el señor rector de la Universidad de Salamanca, principal campeón de la eliminación de los estudios históricos en la enseñanza médica, cuando se le ha argumentado que ello podía poner en peligro la continuidad de la escuela de Laín Entralgo, ha vuelto a responder que el problema carecía de importancia y que, en lugar de hablar de escuelas,


ESTRUCTURA Y NORMA
DE LA
Investigación
Nacional
(TEXTO DE LA LEY, REGLAMENTO Y DISPOSICIONES COMPLEMENTARIAS DEL CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS)

M A D R I D · M C M X L

1. Portada del volumen que incluye la ley fundacional del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, su primer reglamento y otras disposiciones iniciales sobre esta institución.



2. Organigrama del Consejo que aparece en el mismo volumen.

había que preocuparse por impartir una docencia "moderna".

Afortunadamente, en su presente etapa, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas no comparte la actitud citada ni la ignorancia en la que se basa. La voluntad de asumir la tradición de la Junta al lado de la propia ya hemisecular se ha expresado en iniciativas por todos conocidas. Quizá destacan entre ellas la celebración del octogésimo aniversario de la Junta, que ha conducido a la publicación el pasado año de los dos importantes volúmenes sobre el tema coordinados por José Manuel Sánchez Ron, y la "recuperación" de las señas de identidad y de algunas funciones tradicionales de la Residencia de Estudiantes.

Reproducimos el preámbulo de la ley fundacional del Consejo:

"En las coyunturas más decisivas de su Historia concentró la Hispanidad sus energías espirituales para crear una cultura universal. Esta ha de ser también la ambición más noble de la España del actual momento, que, frente a la pobreza y paralización pasadas, siente la voluntad de renovar su gloriosa tradición científica.

"Tal empeño ha de cimentarse, ante todo, en la restauración de la clásica y cristiana unidad de las ciencias, destruída en el siglo XVIII. Para ello hay que subsanar el divorcio y discordia entre las ciencias especulativas y experimentales y promover en el árbol total de la ciencia su armonioso incremento y su evolución homogénea, evitando el monstruoso desarrollo de algunas de sus ramas, con anquilosamiento de otras. Hay que crear un contrapeso frente al especialismo exagerado y solitario de nuestra época; devolviendo a las ciencias su régimen de sociabilidad, el cual supone un franco y seguro retorno a los imperativos de coordinación y jerarquía. Hay que imponer, en suma, al orden de la cultura, las ideas esenciales que han inspirado nuestro Glorioso Movimiento, en las que se conjugan las lecciones más puras de la tradición universal y católica con las exigencias de la modernidad.

"Al amparo de estos principios urge instaurar una etapa de investigación científica, en la que ésta cumpla de manera inexorable sus funciones esenciales: elaborar una aportación a la cultura universal; formar un profesorado rector del pensamiento hispánico; insertar a las ciencias en la marcha normal y progresiva de nuestra Historia y en la elevación de nuestra técnica, y vincular la producción científica al servicio de los intereses espirituales y materiales de la Patria.

"Organo fundamental de impulso y de apoyo a esa tarea debe ser el Estado, a quien corresponde la coordinación de cuantas actividades e instituciones están destinadas a la creación de la ciencia. Es inexcusable contar, en primer término, con la cooperación de las Reales Academias que durante largos años han mantenido el espíritu tradicional de la cultura hispánica y, por otra parte, con la Universidad, que en su doble cualidad de escuela profesional y elaboradora del desarrollo científico ha de considerar a la investigación como una de sus funciones capitales. Hay que enlazar, finalmente, esta acción investigadora con los centros de la ciencia aplicada, singularmente en esta gran hora de España, en que se impone el cultivo de la técnica para aprovechar, en beneficio de la riqueza y prosperidad del país, todas las energías físicas y biológicas de nuestro territorio.

"España, que siente renovada su vida nacional a impulsos de una vi-

gorosa exaltación patria, quiere sistematizar la investigación, aplicarla a desarrollar e independizar la economía nacional y colocar la organización científico-técnica en el primer plano de los problemas nacionales. Coordinados y tensos los órganos investigadores, las posibilidades técnicas de la nación adquieren un desarrollo pujante, y la ciencia crea así, de un modo directo, la potencia de la Patria.

"Por tanto, la ordenación de la investigación nacional se ha cristalizar en un órgano de nueva contextura, cuya misión sea exclusivamente coordinadora y estimulante, sin aspirar a mediatizar los centros e instituciones que con vida propia se desarrollan. Debe conservar lo que cada uno ha sabido constituir y no disociar de la Universidad los centros investigadores; caso por caso, según circunstancias concretas, los ligará a la Facultad o centros docentes respectivos, o los mantendrá separados, atento ante todo a la eficacia del trabajo y a considerar que son los centros para servir la función, no la función para recompensar a los centros. Al mismo tiempo hay que estimular la investigación científica, concretamente, sin declaraciones cuya generalidad ya supone ineficacia.

La investigación requiere, como condición primordial, la comunicación e intercambio con los demás centros investigadores del mundo. La estancia de nuestros profesores y estudiantes en el extranjero y la estancia en España de profesores y estudiantes de otras naciones, así como la colaboración en Congresos científicos internacionales, exigen un sistema de pensiones, bolsas de viajes, residencias, propuestas e invitaciones. España tiene que mantener, con el relieve que conviene a su grandeza, las relaciones de aportación y asimilación que la vida cultural implica, de modo general con todos los países, de modo especialísimo con aquellos sobre los que proyecta los indelebles caracteres de su señorío espiritual.

"Estas razones impulsan a ensalzar en el mismo órgano rector la tarea de la investigación y creación de la ciencia y la de su expansión e intercambio a través de los distintos países.

"El órgano que se establece tendrá toda la libertad de acción que conviene a su eficacia y toda la estabilidad que reclama su continuidad. Subordinado en todo a los más altos intereses culturales del Estado habrá de servir siempre con la más exquisita disciplina nacional las supremas ambiciones espirituales de la España que resurge para influir de nuevo poderosamente en el mundo".



Física del botafumeiro

Hace siete siglos se instaló un mecanismo destinado al culto en la catedral de Santiago de Compostela, que introduce efectos dinámicos refinados. Pudo haber originado las primeras experiencias sobre caos determinista

Juan R. Sanmartín Losada

El 11 de diciembre de 1494, un viajero alemán, el médico Jeronymus Munzer, pernoctó en Redondela. Aunque alojado en casa de un compatriota de Frankfurt, Munzer, reportero a su manera, no menciona en su crónica latina la carabela atracada en la vecindad el año anterior con noticia de gentes miles de millas mar adentro. Sí alude, por dos veces, a un rito celebrado en Compostela, santuario de Santiago el Mayor durante siete siglos y adonde llegó el 13 de diciembre. Quinientos años más tarde, y en ciertos servicios litúrgicos, el viajero aún puede asistir a esta singular celebración.

De una estructura en lo alto del crucero de la catedral se cuelga por una cuerda el botafumeiro, un incensario gigante al que se desvía, de un empujón, de la vertical. Mientras se balancea como un péndulo, ocho hombres en el suelo, al otro extremo, sueltan cuerda en el punto más alto del movimiento y tiran de ella en el más bajo. Paso a paso, cíclicamente, los tiradores amplifican así la oscilación del incensario, hasta llevarlo a 21 metros, en lo alto de la bóveda, en un arco de 65 metros a lo largo del transepto, a 68 kilómetros por hora en un punto a ras de suelo.

Los elementos mecánicos implicados en el rito son muy simples y se han conservado registros de ciertas mejoras introducidas tras los comienzos, en el siglo XIII. La estructura de soporte actual es un armazón de hierro atornillado a cuatro sustentáculos que arrancan de los grandes pilares del crucero; según actas del cabildo catedralicio de 1602, la estructura se montó ese mismo año, tras considerar que la anterior, un sistema de vigas a través del crucero, al nivel de las bóvedas, obstruía excesivamente la luz que bajaba de las vidrieras del cimborrio. La cuerda está devanada en dos tambores de madera de castaño, de 58 y 29 centímetros de diámetro, con el eje común apoyado en el armazón sobre simples cojinetes de deslizamiento. Para reemplazar la cuerda, como en 1975 o hace cuatro años, se extiende una escalera de mano desde una estrecha balconada que ciñe el interior del cimborrio; se accede a aquélla por una vidriera, caminando sobre la techumbre de piedra desde una torre en la fachada occidental.

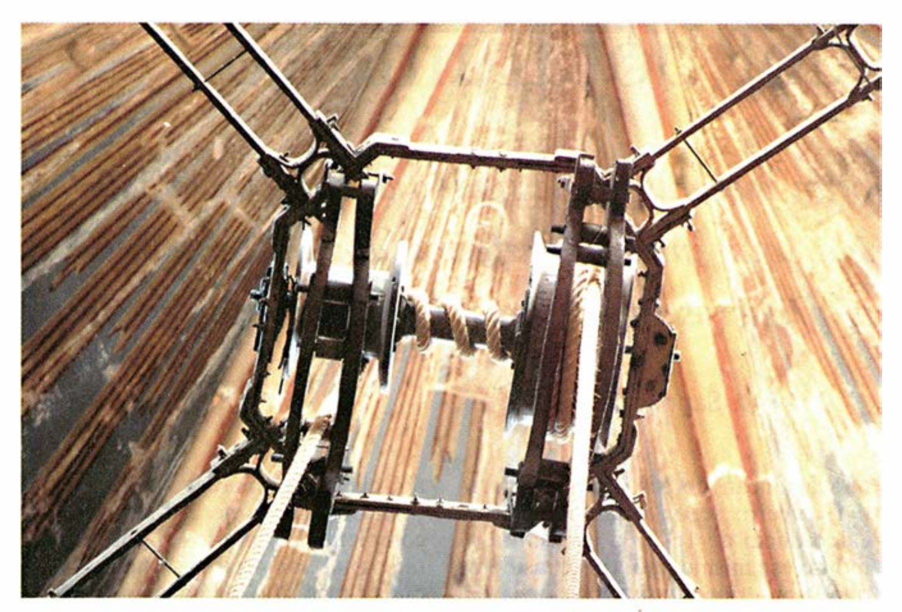
El botafumeiro actual es de latón plateado y pesa unos 53 kilogramos; un artículo de 1852, del *Semanario Pintoresco Español*, señala que sustituyó a uno de hierro el año anterior. Hay una primitiva referencia a un botafumeiro de plata en una nota de principios del siglo XIV y una última en un libro impreso en 1615, pero los registros del Archivo de la Catedral sugieren que ya se usaba uno de hierro en 1812, cuando lo reparó un "calderero", y en 1729, cuando fue "estañado". Con un cuenco lleno de brasas e incienso en su interior, y tres metros de cuerda en un nudo en lo alto, el incensario actual es un cuerpo semirrígido de más de 56 kilogramos de peso. En su posición más baja, el centro de gravedad pasa 1,2 metros sobre el suelo y 20,6 metros por debajo del eje de los tambores.

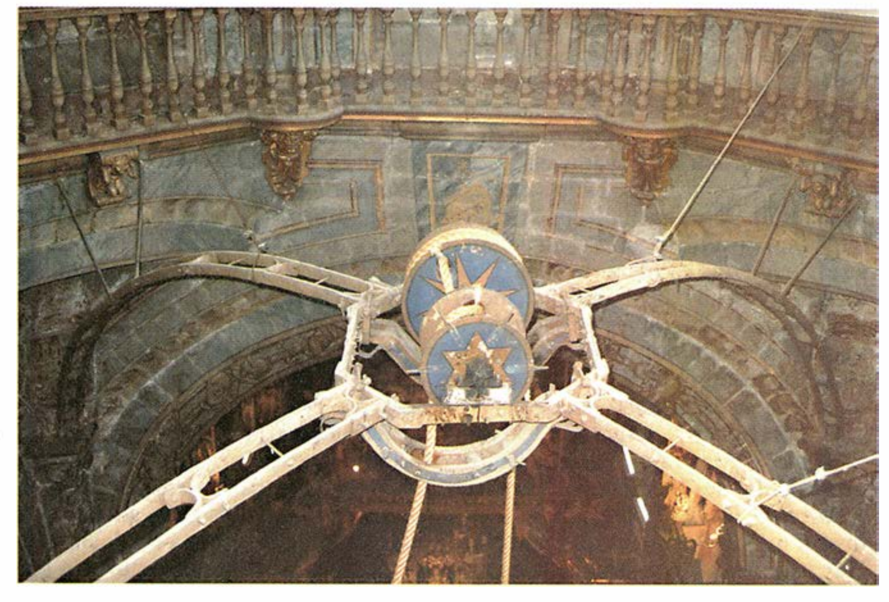
La secuencia mecánica es sencilla. El tambor grande está del lado opuesto a los tiradores, de modo que el conjunto funciona a la inversa de un torno: multiplica desplazamientos, no fuerzas. Cada vez que el botafumeiro se aproxima a la vertical, los hombres dan un tirón y desenrollan casi metro y medio de cuerda del tambor pequeño; el eje gira más de vuelta y media y alza el incensario 2,9 metros. Para completar el ciclo los tiradores sueltan igual longitud de cuerda en el punto más alto de la oscilación. Se podría usar dos cuerdas (no hay deslizamiento sobre los tambores), pero es más fácil sujetar una pasándola de uno a otro por agujeros en el resalte de carrete en sus extremos. Tras el empujón inicial, la amplitud de oscilación es de unos 13 grados. Requiere alrededor de 80 segundos y 17 ciclos (semiperíodos de oscilación del incensario) alcanzar una amplitud máxima de 82 grados, medio metro por debajo de la bóveda.

Si la distancia del botafumeiro a la estructura soporte no variase, aquél se movería como un péndulo, y la tensión en la cuerda no realizaría trabajo mecánico. En un péndulo ideal (una partícula que colgara de una cuerda de masa nula, sin pérdidas energéticas), la energía total, suma de la cinética o del movimiento y la gravitatoria, se mantiene constante al pasar el tiempo. La constante viene dada por el valor de la energía gravitatoria en el punto superior de la oscilación, donde la cinética es nula; es decir, el valor constante de la energía

1. TRANSEPTO de la catedral de Santiago de Compostela. Construido hace nueve siglos, mide 65 metros de extremo a extremo y 20,8 metros de alto. En ciertos servicios litúrgicos, el ornamento de plata que cuelga en el crucero de una estructura al nivel de la bóveda se sustituye por un incensario gigante, el botafumeiro. Puesto éste en balanceo de un empujón, un equipo de tiradores lo lleva a una velocidad máxima de 68 kilómetros por hora, variando cíclicamente la longitud de la cuerda desde el extremo opuesto.

JUAN R. SANMARTIN LOSADA es catedrático de física en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos (Universidad Politécnica de Madrid) desde 1974. Dirige el departamento de física aplicada. Ingeniero por ese centro y físico por la Universidad Complutense en 1965, doctor por la Universidad de Colorado en 1967, en los cuatro años siguientes realizó investigación en la Universidad de Princeton y el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Con posterioridad trabajó en el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, se doctoró y enseñó en la Escuela citada y volvió de visitante a la Universidad de Colorado y el MIT. Su principal campo de trabajo ha sido física y dinámica de plasmas.





2. ESTRUCTURA SOPORTE DEL BOTAFUMEIRO, un marco de hierro atornillado a cuatro sustentáculos, también de hierro, empotrados en los pilares del crucero; el conjunto trabaja como un arco. Instalada en 1602, fue reforzada recientemente con tirantes para abortar un fallo incipiente en los encastres. Los tambores coaxiales tienen diámetros de 29 y 58 centímetros; el pequeño, en el lado de los tiradores. Para alzar el incensario 2,9 metros, los tiradores han de desenrollar cuerda en la mitad de ese valor. Las tensiones en uno y otro lado están en razón inversa de los diámetros respectivos.

total viene dado por el producto del peso por la altura máxima sobre el punto inferior.

Para caracterizar la energía podemos usar, en vez de esta altura, la amplitud de la oscilación, o la velocidad máxima, dada por la fórmula de caída libre; fórmula según la cual el cuadrado de la máxima velocidad es igual al doble de la aceleración de la gravedad por la altura máxima.

En el caso del botafumeiro, para el que velocidades y recorridos son grandes, las pérdidas de energía mecánica por resistencia del aire tienen un efecto apreciable. La determinación teórica de resistencias es imposible en la práctica, excepto para condiciones y formas de cuerpo especiales, lo que no se da en el botafumeiro. Este es, sin embargo, un problema estándar en aerodinámica experimental. La resistencia a un cuerpo en movimiento de traslación uniforme a través del aire se determina cómoda e indirectamente en un túnel de viento, donde una corriente de aire pasa en torno a un modelo del cuerpo, a escala conveniente y en reposo.

De las medidas se obtiene el coeficiente de resistencia, definido como el valor de ésta dividido por el semiproducto de la densidad del aire, el cuadrado de la velocidad y un área frontal característica. Por tratarse de un cociente de dos fuerzas, constituye una cantidad *adimensional* (su valor no se altera si se eligen nuevas unidades de medida), razón por la cual sólo puede depender de los parámetros adimensionales que caracterizan el movimiento. Si se desprecia la compresibilidad del aire, lo que es permisible a velocidades pequeñas comparadas con la del sonido, esos parámetros son todos los que fijan la forma del cuerpo y su orientación respecto a la corriente, junto con un indicador de efectos de viscosidad llamado número de Reynolds; esta última magnitud expresa la razón del producto de la velocidad relativa por el tamaño característico, a la viscosidad cinemática del aire. En consecuencia, cuerpo y modelo, cuando se hallen igualmente orientados, poseerán el mismo coeficiente a velocidades que estén en proporción inversa a los tamaños; en esas condiciones, la resistencia, que es proporcional al área frontal por el cuadrado de la velocidad, será también igual para ambos.

En el caso del incensario, las velocidades de interés para la resistencia van desde la máxima alcanzada en el movimiento, 19 metros por segundo, a un valor, digamos, diez veces menor: a velocidades inferiores, la resistencia es demasiado pequeña para contribuir sensiblemente a la pérdida de energía (o para permitir mediciones precisas en el túnel). Las medidas se realizaron con un modelo comercial del incensario a escala 1/4,5 con el eje perpendicular al viento. A la máxima velocidad de interés para el modelo, 4,5 × 19 metros por segundo (1/4 de la velocidad del sonido), los efectos de compresibilidad apenas son apreciables; es claro que tales efectos harían inútil un modelo sensiblemente menor. Se midió la fuerza del aire en la dirección opuesta al movimiento (resistencia) y en la dirección perpendicular a lo largo del eje (sustentación); esta última, que no sobrepasa el 1 por ciento de la fuerza centrífuga, solamente afecta, y de forma mínima, a la tensión de la cuerda.

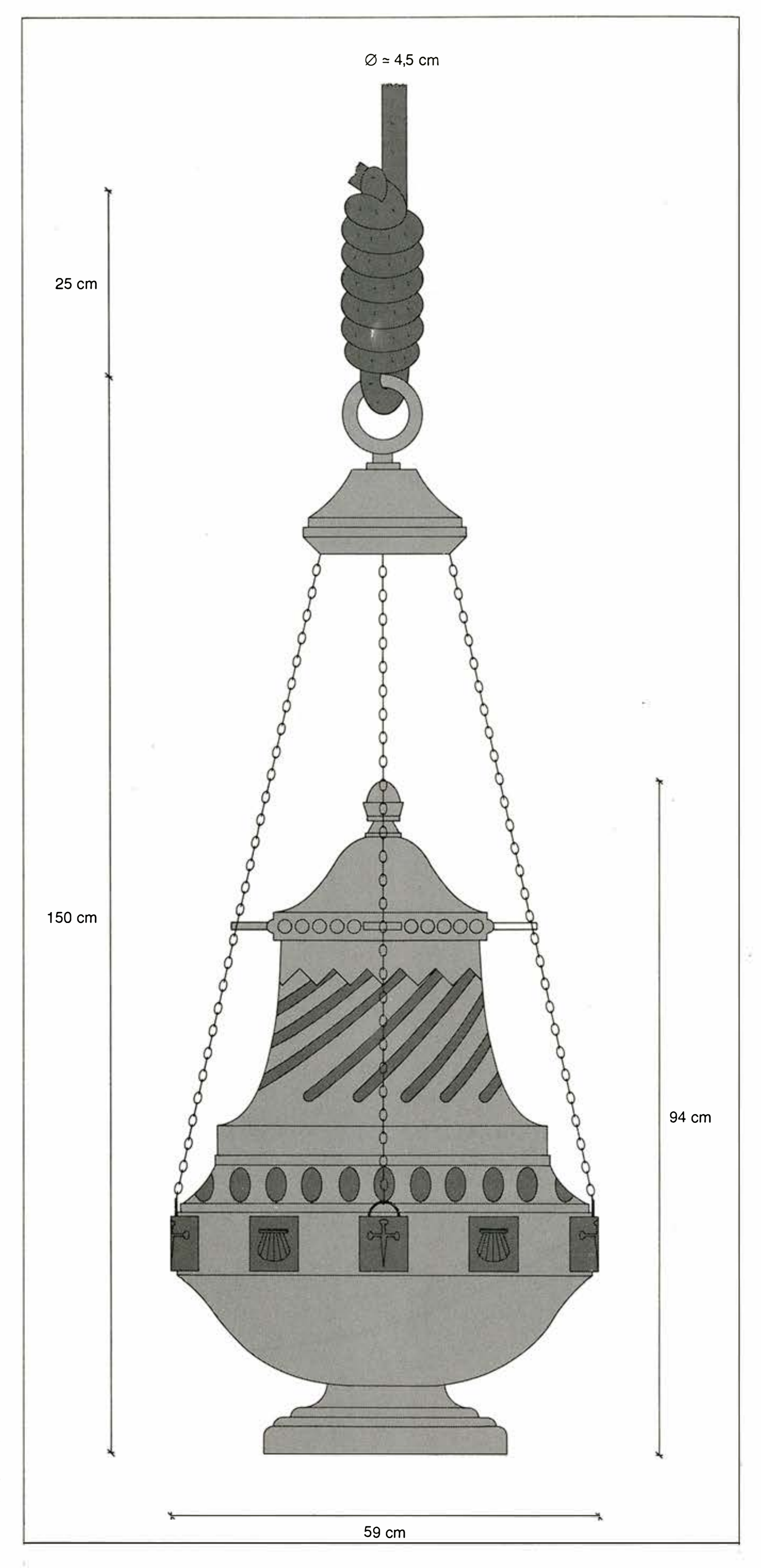
¿Podemos usar valores de resistencia correspondientes al movimiento de traslación uniforme para la trayectoria real del botafumeiro? El movimiento de éste difiere poco de una rotación en torno al eje de los tambores, de modo que la velocidad de un punto del botafumeiro es proporcio-

nal a su distancia al eje. Las distancias características caen en el intervalo, digamos, 20,6 ± 0,4 metros. Asociar su movimiento al de traslación representa, pues, un error del 2 por ciento. Suponerlo uniforme tiene una validez y un fundamento semejantes: la cuerda es muy larga.

La cuerda misma sufre una resistencia, pero no fue preciso medirla. La parquedad de la razón de diámetro a longitud nos faculta para considerar segmentos de cuerda como partes de un cilindro de longitud infinita en traslación uniforme a la velocidad local. El coeficiente de resistencia de un cilindro infinito –definido como el valor de la siguiente expresión: (resistencia por unidad de longitud) / 1/2 × (densidad del aire) × (velocidad local)^2 × (diámetro)– es una función bien conocida del número de Reynolds, que cifra, recuérdese, la razón del producto de la velocidad y el diámetro a la viscosidad cinemática del aire.

Conocidos los coeficientes de resistencia, es posible calcular la pérdida de energía en un ciclo, entre dos puntos de altura máxima. Si la pérdida relativa es pequeña, podemos despreciarla en el cálculo y suponer que la energía es constante en el ciclo. De ello se infiere que la pérdida relativa por ciclo, debida a la cuerda o al mismo incensario, es proporcional al cociente entre el peso del aire barrido por uno u otro y el peso del incensario. La pérdida total de energía es la suma de las dos parciales.

Se puede incrementar la energía de la oscilación variando la longitud de cuerda que cuelga hasta el incensario (su radio de giro). La acción de variar un parámetro de un oscilador se llama bombeo; la amplificación del movimiento del incensario constituye, en efecto, un ejemplo de amplificación paramétrica por bombeo, como el columpio familiar en el que un niño se agacha y levanta cíclicamente. Cuando la longitud de cuerda varía, la tensión realiza trabajo. El trabajo es positivo (e incrementa la energía) en una etapa que acorta la cuerda, y negativo en el caso opuesto. Para un ciclo completo, que implica



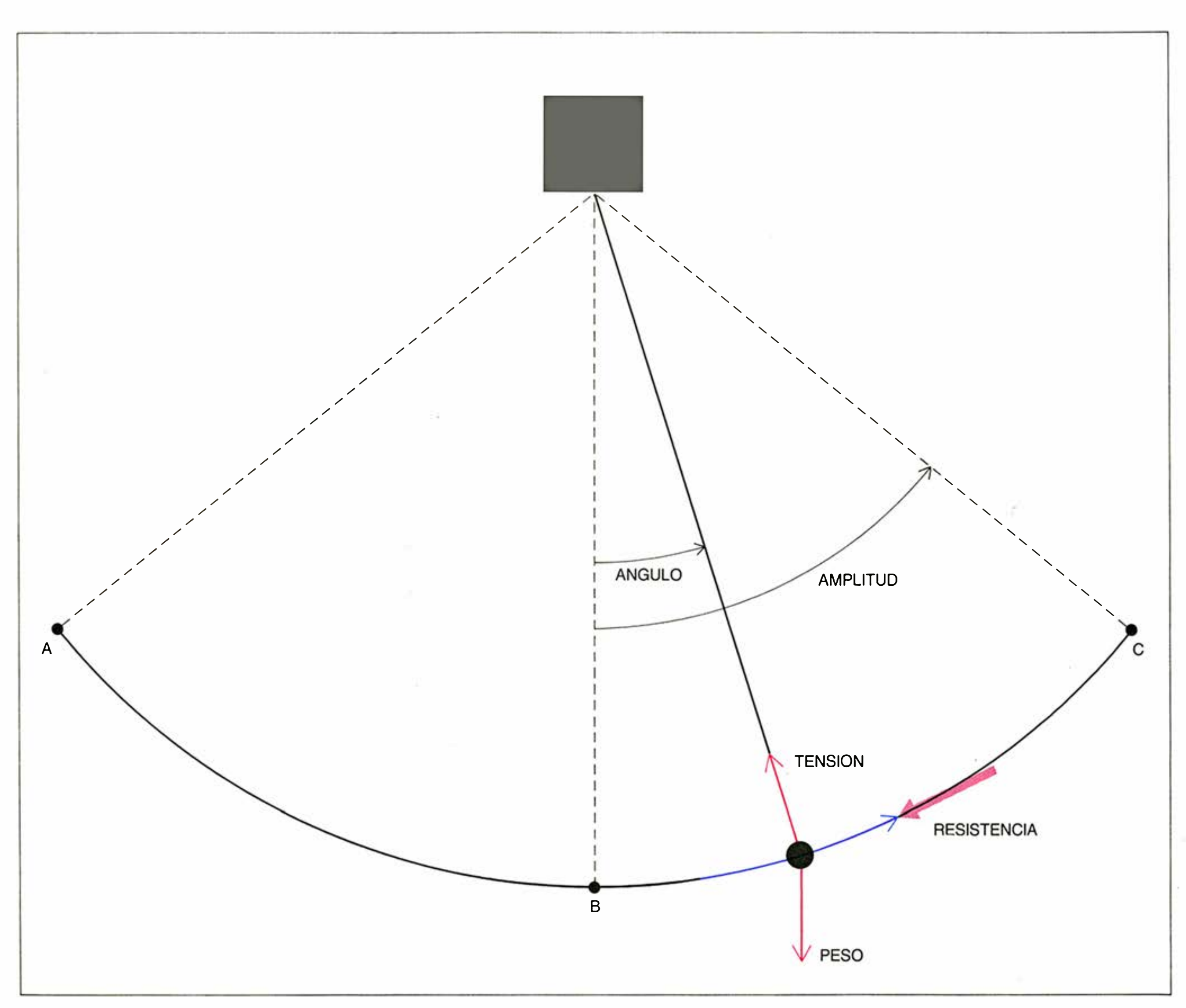
3. BOTAFUMEIRO utilizado en la actualidad, fabricado en 1851 en latón plateado; todavía en 1615 se usaba uno de plata; uno de hierro, al menos desde 1729. El actual pesa más de 53 kilogramos y su centro de gravedad, a 55 centímetros de la base, cuelga 20,6 metros por debajo del eje soporte y 1,2 metros sobre el suelo. Una cuerda de 4,7 centímetros de grosor remplazó hace cuatro años a la mostrada en la ilustración.

alargamiento y acortamiento, la ganancia por bombeo, esto es, el trabajo neto de la tensión puede adquirir uno u otro signo.

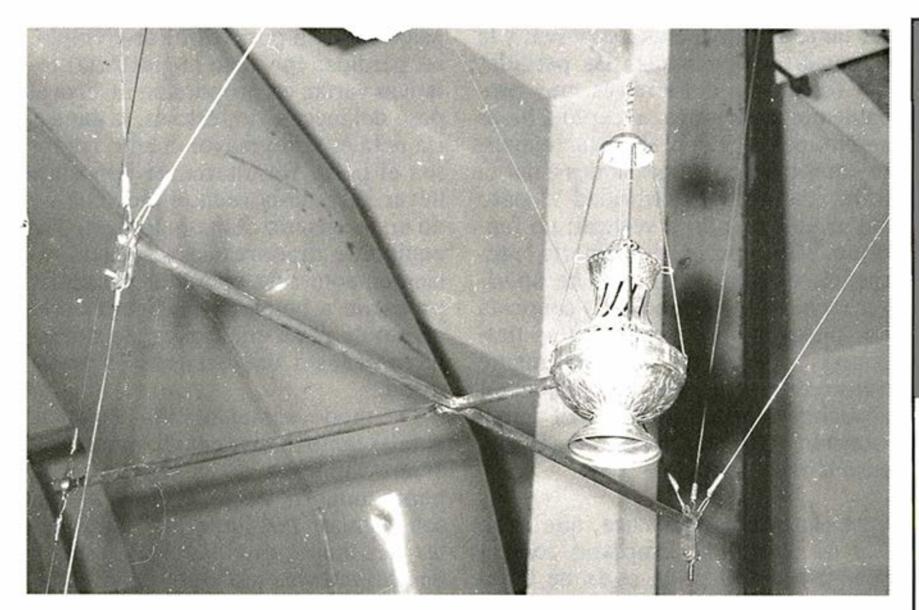
La aceleración radial durante una etapa de bombeo resulta del desequilibrio de las fuerzas (tensión, fuerza centrífuga y parte del peso) que actúan a lo largo de la cuerda. No hay movimiento radial antes o después del bombeo, por lo que el trabajo de la tensión en toda la etapa es igual y opuesto al trabajo combinado de las otras dos fuerzas. Esto permite determinar fácilmente la secuencia de movimientos (óptima) que produce una ganancia máxima por ciclo, dado un pequeño desplazamiento radial del incensario en una y otra etapa. Como en el caso de pequeñas pérdidas por resistencia del aire, se pueden calcular los efectos del bombeo suponiendo que la energía es constante en el ciclo. Resulta claro, entonces, que el acortamiento de la cuerda se ha de realizar *instantáneamente, en el punto inferior de la oscilación*, cuando todo el peso tira de la cuerda y es máxima la fuerza centrífuga, que está dada por el cociente entre energía cinética y semilongitud de cuerda. Y se ha de soltar ésta, hasta llevarla a su longitud nominal, *en el punto superior*, donde la acción del peso es mínima y, la fuerza centrífuga, nula.

Se obtiene así la ganancia óptima por bombeo. El valor de la ganancia relativa por ciclo es igual al triple del acortamiento de la cuerda dividido por la longitud nominal. Nótese que la ganancia relativa no crece con la amplitud, como ocurría en el caso de las pérdidas, de modo que la resistencia del aire, despreciable a baja amplitud, puede finalmente dominar al bombeo. La ganancia absoluta es pequeña a baja amplitud; como ha observado el sacristán mayor de la catedral, quien dirige el equipo de tiradores, la amplificación de las oscilaciones requiere un tiempo desusadamente largo si el empujón inicial es débil.

El movimiento real del incensario difiere poco del óptimo. Repetidas observaciones verifican que sí se bombea en torno a los puntos inferior y superior de la oscilación. La acción es, además, razonablemente instantánea, esto es, breve comparada con la duración del ciclo; la razón principal estriba en que el acortamiento re-



4. PENDULO SIMPLE. Tensión y peso tratan de llevarlo a su posición normal de equilibrio (punto *B*). Como la velocidad crece al aproximarse a este punto, el péndulo lo sobrepasa y oscila en vaivén entre *A* y *C*, intercambiando energías cinética y gravitatoria. La energía total permanece constante: la tensión, perpendicular al desplazamiento, no realiza trabajo mecánico. En un péndulo real, grande, la resistencia del aire es la causa dominante de pérdidas energéticas. Si no se tiene en cuenta el giro de la cuerda, hay que incluir una "fuerza" de inercia, centrífuga (no dibujada).



5. MODELO DEL INCENSARIO EN UN TUNEL DE VIENTO. El modelo está fijado por riostras y alambres a balanzas para medir las fuerzas y momentos que sobre él ejerce el aire, y lleva un nudo simulado en lo alto y varillas en lugar de cadenas. Se halló una resistencia de 0,15 y 3,4 kilogramos a 3,1 y 13,0 metros por segundo, respectivamente. La fuerza perpendicular al movimiento (sustentación) es de un 10 a un 15 por ciento de la resistencia. Como el incensario presenta casi completa simetría de revolución, solamente fue necesario medir el momento de balanceo; las medidas muestran que la fuerza neta del aire actúa sobre el eje del incensario a unos 10 centímetros por debajo del centro de gravedad. Los números de Reynolds de interés caen dentro del intervalo 10^5-10^6.

lativo (2,9 metros / 20,6 metros) es pequeño y en que la aceleración de la gravedad determina el movimiento pendular *y* las etapas de bombeo. El período de un péndulo de 20,6 metros va de 9,1 segundos, a 13 grados, a 10,5 segundos, a 82 grados; un ciclo dura así alrededor de 5 segundos.

La caída libre del incensario desde el punto superior, cuando los tiradores sueltan cuerda y la tensión se relaja en el extremo opuesto, dura tan sólo 0,77 segundos a baja amplitud. En la etapa del punto inferior, los tiradores, que actúan oblicuamente sobre bramantes atados a la cuerda, dan un tirón de hasta unos 3/4 de su peso combinado; a ello sigue una fase, relajada la tensión, en la que el peso termina anulando el movimiento radial del incensario. Si se desprecia la inercia de cuerda y tambores (que son huecos) y el par de fricción sobre su delgado eje, las tensiones a uno y otro lado de aquélla están en razón inversa a los radios de los tambores respectivos; el tirón en el lado del botafumeiro resulta ser de unas cuatro veces su peso. A grandes amplitudes, la duración de la etapa es de 0,75 segundos.

Una conclusión a añadir es que el botafumeiro es una máquina mucho más eficiente que un columpio. El columpio típico es 10 veces más corto, por lo que su ciclo, de segundo y medio, resulta demasiado breve para un buen seguimiento de la secuencia óptima. Por otra parte, el acortamiento relativo de su longitud pendular no es pequeño, por lo que el bombeo tampoco es, ciertamente, instantáneo. El columpio, un péndulo corto y pesado, presenta una ventaja: la resistencia del aire apenas influye.

El descubrimiento del procedimiento óptimo para bombear el incensario constituye un hecho notable, lo que no puede decirse del columpio. Niños de todas las épocas aprendieron a columpiarse lo mismo que ahora aprenden a montar en bicicleta: la percepción y el control inconscientes del propio movimiento forman parte esencial del proceso. Nunca hubo necesidad de una regla para bombear un columpio, y, por lo que se sabe, ésta no se hizo explícita hasta tiempos modernos. En el caso del botafumeiro, sin embargo, no está involucrada la percepción del propio cuerpo y, puesto que actúa un equipo cuyo director da órdenes en ciertos momentos, se impone establecer una regla.

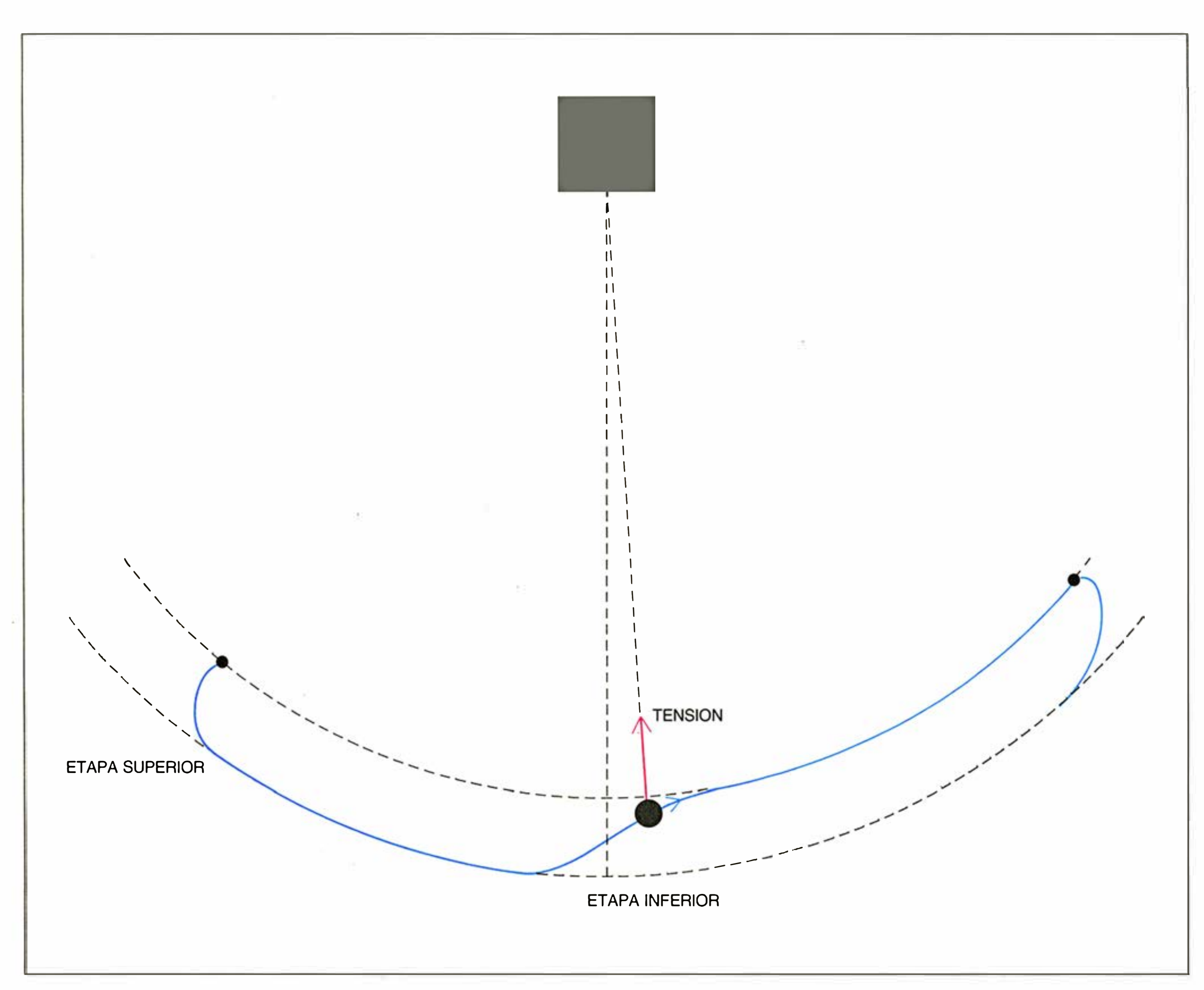
La regla fue descubierta unos 400 años antes de que Galileo y Huyghens analizaran el péndulo. El libro III de un códice latino del siglo XII, el *Liber Sancti Jacobi*, describe una procesión en el interior de la catedral, en cierta ceremonia litúrgica. La carrera del botafumeiro es, en la actualidad, parte de esa ceremonia, pero no lo era en el siglo XII: el códice no menciona el incensario, aun cuando, al detallar

la novísima catedral en el libro V, hace referencia a una lámpara aromática gigante colgada entonces en el crucero. Pero una nota en latín del primer cuarto del siglo XIV, en el margen del folio CLXII sobre la ceremonia, describe la carrera del incensario y declara que "es ahora" parte del acto litúrgico. Parece así razonable afirmar que la regla se descubrió en algún momento del siglo XIII. Conviene señalar, como contraste o curiosidad, que en el *Liber Pontificalis*, una historia medieval del papado, se menciona un incensario de oro gigante, colgado en el crucero de la primitiva basílica de San Pedro en tiempos de Sergio I, a finales del siglo VII; no existe noticia alguna de que fuese puesto nunca en movimiento.

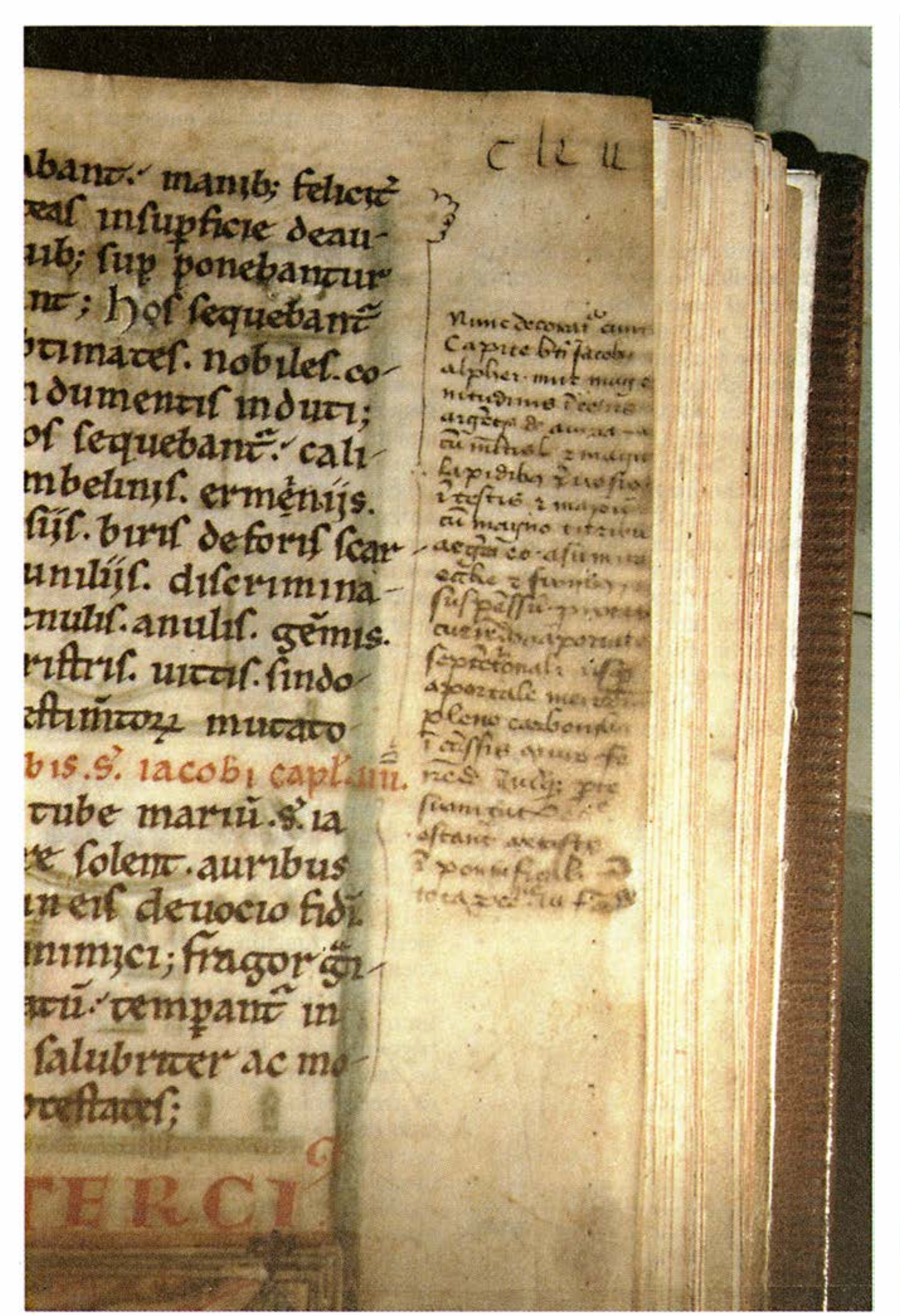
El descubrimiento de la regla no pudo ser fácil. Para una secuencia de bombeo arbitraria, la ganancia puede ser tanto negativa como positiva; y la ganancia neta, restadas las pérdidas por resistencia del aire, es muy probablemente negativa, excepto a bajas amplitudes. Según el sacristán mayor, su equipo probó en ocasiones a dar el tirón con clara anterioridad al paso del incensario por la vertical; no funcionó. Mas, una vez descubierta la secuencia óptima, se dispuso de un saber técnico: la secuencia era conocida por un círculo de expertos (los tiradores) y podía ser cuidadosamente transmitida por lenta y repetida renovación de sus miembros. El actual sacristán se unió al equipo en 1950 y pasó a encabezarlo en 1964.

Es claro, por otra parte, que hubo de existir un temprano conocimiento no sólo de la regla de bombeo, sino también de la influencia de ciertos elementos mecánicos sobre la ganancia neta por ciclo. Por ejemplo, las pérdidas (pero no la ganancia) relativas varían en proporción inversa al peso del incensario, esto es, la ganancia neta es tanto mayor cuanto menor sea el peso. Resultaría así imposible llevar hasta la bóveda el movimiento de un incensario demasiado ligero. El equipo de tiradores ha verificado recientemente esta aparente paradoja; probaron a bombear un ligero ornamento de plata que cuelga usualmente en el lugar del incensario y fracasaron.

De modo semejante, la ganancia neta es tanto menor cuanto menor sea el acortamiento de la cuerda en el punto inferior de la oscilación. Un solo tambor resultaría así insuficiente. Sin mecanismo multiplicador, el desplazamiento radial del botafumeiro sería de metro y medio, la misma longitud de cuerda que los tiradores



6. CICLO OPTIMO para variación relativa del radio pequeña. Al acortar la longitud del péndulo, la tensión realiza trabajo positivo (con aumento de la energía de oscilación) contra las fuerzas centrífuga y del peso. Si la variación radial es pequeña (bombeo débil), la fuerza centrífuga toma valores próximos a los propios en ausencia de bombeo. El ciclo óptimo incluye una etapa de acortamiento instantánea en el punto inferior de la oscilación, donde el peso actúa radialmente y la fuerza centrífuga es máxima, así como una etapa de alargamiento en el superior, donde se da lo opuesto.



7. FOLIO CLXII del *Liber Sancti Jacobi*, un códice regalado a la catedral de Santiago de Compostela a mediados del siglo XII y guardado en el archivo de la seo, donde se lee el texto más antiguo sobre el botafumeiro. El folio corresponde al final del capítulo III del libro III y describe una procesión ceremonial en el recinto catedralicio sin mencionar el incensario. Una nota al margen, añadida menos de 200 años después, describe la cárrera de aquél, "ya" parte de la ceremonia: "nunc decoratur... maxime cum magno *turibulo* argenteo, a sumitate ecclesiae et funibus suspensum per rotas currendo a portale septemtrionali usque a portale meridiano, pleno carbonibus incenssus cum ture feriendo in utraque parte sumitatis ecclesiae..." ["Ahora se engalana... con un gran incensario de plata, que discurre, suspendido en la parte superior del templo por cuerdas, desde el portal norte al sur, lleno de carbones encendidos y portando incienso a un lado y otro de la parte superior de la basílica."]

desplazan en su lado, la máxima que un bombeo confortable permite; la amplitud límite alcanzable sería de 55 grados, muy por debajo de la bóveda. Posiblemente, se usó un solo tambor en los primeros ensayos, pero pronto hubo de percibirse la necesidad de incrementar el desplazamiento radial en el bombeo, mediante tambores coaxiales de diferentes diámetros: la nota marginal en el códice señala que el incensario llegaba a la bóveda.

La existencia de un saber técnico sobre mecanismos y procedimiento queda corroborada en la propia difusión del rito. La tradición mantiene que las catedrales góticas de Orense y

Tuy, a 100 kilómetros una de otra y de Compostela, tuvieron botafumeiros propios en el pasado. No queda traza de ellos, pero las Actas del Cabildo de Orense del año 1503 prueban que un incensario gigante recorría el transepto de su catedral en ocasiones especiales. La peregrinación a Santiago de Compostela no decayó hasta el siglo XVI; ¿por qué, entonces, no tuvo el rito mayor difusión? La respuesta podría residir en la arquitectura de las iglesias: al tiempo de su nacimiento, prevalecía ya el gótico sobre el románico. Las catedrales de Orense y Tuy tienen bóvedas de altura modesta, comparables con la seo de Santiago, por lo que no pudo ofrecer dificultades trasladar la técnica. Pero las bóvedas góticas típicas son casi dos veces más altas. Las dificultades de hacer correr un botafumeiro de doble longitud pendular pudieron parecer insuperables. El aumento sustancial de pérdidas por resistencia del aire lleva a aumentos sustanciales en la masa del incensario y en el grosor y el desplazamiento radial de la cuerda; y aun cuando esto se hubiera comprendido en la época, hubiese implicado estructuras de soporte excesivamente pesadas, muchos tiradores y mecanismos multiplicadores complejos.

El momento que ejerce el peso de un péndulo sobre su eje soporte se anula en el *instante* del paso por la vertical. De acuerdo con ello suele determinarse y explicarse la ganancia en la etapa inferior del bombeo de un columpio. Sin embargo, para considerar instantánea la etapa, resulta necesaria una aceleración radial de bombeo mucho mayor, en promedio, que la gravitatoria. Esto no se cumple en columpios que cuelgan de cuerdas, por la misma razón que en el caso del botafumeiro: la cuerda nunca ejerce sobre éste una fuerza hacia abajo, lo que supondría tensión negativa, y la gravedad interviene siempre en el frenado vertical. Aunque el argumento no es válido para columpios de barras rígidas, la conclusión es la misma en la práctica, porque la fuerza que el niño pone en juego en el proceso no excede, en orden de magnitud, a su propio peso. Como ya se observó, en un columpio típico las etapas de bombeo cubren una fracción apreciable del ciclo.

La realización de trabajo neto, con una variación radial *neta* nula, se funda en la posible diferencia de tensiones en las dos etapas de un ciclo. La verificación y la optimización de esa posibilidad resultó fácil en el caso de pequeño acortamiento relativo: bastó con atender a la evolución de la tensión a lo largo del movimiento, en ausencia de bombeo. Ganancia y ciclo óptimos adquieren entonces un carácter universal e independiente del valor del cociente entre la aceleración radial en promedio y la aceleración de la gravedad. No obstante, el ciclo óptimo puede recibir otra interpretación en el caso particular de bajas amplitudes.

En estas condiciones, el péndulo es un oscilador armónico: su frecuencia de oscilación ω es la misma a diferentes amplitudes, siempre pequeñas. Cualquier modulación del radio pendular, o secuencia de bombeo repetida cíclicamente cada semiperíodo del movimiento del péndulo, se convierte en función periódica de frecuencia 2ω. Tenemos un ejemplo en la función que representa el ciclo óptimo; otro, en la función seno de la trigonometría. Un oscilador armónico, modulado según una función seno de frecuencia Ω, obedece a la ecuación de Mathieu. Es sabido que esta ecuación exhibe una resonancia e inestabilidad paramétrica (energía del oscilador creciente) para ciertos valores de Ω. En el caso de modulación débil solamente hay crecimiento apreciable si Ω dobla la frecuencia de oscilación ω. Para esta modulación de tipo seno con frecuencia 2ω, el incremento relativo de energía del oscilador armónico resulta ser $\pi/4$ veces menor que el ya hallado para modulación óptima.

Ahora bien, para una secuencia de bombeo arbitraria, la técnica del análisis de Fourier permite escribir la modulación, de frecuencia 2ω, como una suma de funciones seno de frecuencias 2ω, 4ω, 6ω, etcétera, por coeficientes de Fourier apropiados. Si la modulación es débil, sólo el término de frecuencia 2ω contribuirá al crecimiento o ganancia de energía. Dedúcese de ello que el problema de determinar la secuencia óptima para una pequeña variación radial dada equivale al de encontrar, entre todas

8. ESQUEMA DEL CICLO DE BOMBEO OPTIMO, supuesto débil, a bajas amplitudes. En este caso, la duración de un ciclo (un semiperíodo pendular) es independiente de la amplitud, y cualquier bombeo cíclico es un proceso periódico. La figura nos muestra la variación relativa, normalizada, del radio del péndulo para el ciclo óptimo (*línea roja continua*, función escalón) y las componentes sinusoidales primera (frecuencia igual a la del ciclo) y tercera (frecuencia tres veces la del ciclo) de su suma de Fourier (*líneas rojas discontinuas*; no hay componentes pares). De las funciones periódicas de período y magnitud dados, la función escalón es la de máxima primera componente: 4/π veces la función seno (*línea azul*). A bajas amplitudes, la ecuación de un péndulo débilmente bombeado (ecuación de Mathieu) muestra que sólo la primera componente de Fourier determina la amplificación.

las funciones periódicas de frecuencia y valores máximo y mínimo dados, aquella para la cual es mayor el primer coeficiente de Fourier. La solución a este último problema es la función que salta discontinuamente ("instantáneamente") entre los valores máximo y mínimo, el ya conocido ciclo óptimo. ¡Su primer coeficiente es $4/\pi$ veces el valor del salto!

¿Es segura la carrera del botafumeiro? El momento más peligroso para un accidente ocurre en lo más alto de los primeros ciclos. Al frenar al incensario de casi 60 kilogramos que cae desde ese punto, la cuerda sufre un tirón que es máximo a baja amplitud, cuando la oscilación es casi horizontal. La energía cinética de la caída libre, unos tres metros, se transforma en su mayor parte en energía elástica, que es proporcional a la tensión máxima y al muy pequeño alargamiento de la cuerda. Porcentualmente, el alargamiento viene dado por el cociente entre esfuerzo (tensión por unidad de área de la sección transversal de la cuerda) y una cantidad característica de su material llamada módulo de Young. Para determinado material y longitud, así como cierta energía de caída, resulta un esfuerzo inversamente proporcional al diámetro de la sección.

Las tres últimas cuerdas en uso han sido de yute, pero en el pasado se empleó el cáñamo. Un esfuerzo de 800 kilogramos por centímetro cuadrado es típico de la rotura, aunque puede haber deformación permanente a la mitad de ese valor. Con un módulo de Young estimado en unos 150.000 kilogramos por centímetro cuadrado, se alcanzan los 400 kilogramos por centímetro cuadrado, en el lado de los tiradores, para un diámetro de 3 centímetros. Se utilizó una cuerda de 4,5 desde 1975 hasta hace unos cuatro años, anteriormente una de 4, y en la actualidad de 4,7. Sin embargo, en una fotografía del primer tercio de siglo se aprecia un grosor de 3,2 centímetros, y un asiento en el Libro de Fábrica de 1673 sugiere un diámetro aún menor. Los tiradores no dejan que la caída sea enteramente libre; de otro modo, el tirón podría alzar su centro de gravedad hasta 10 centímetros.

Resulta fácil imaginarse un accidente de este tipo. El botafumeiro cae verticalmente, cerca del centro del crucero. Así ocurrió el 23 de mayo de 1622, cuando, rota la cuerda, el botafumeiro se precipitó a plomo al lado de los tiradores, que actúan casi debajo de la estructura soporte. Se sabe, además, de una segunda caída: el 25 de julio de 1499 se soltó el incensario y, como un proyectil, recorrió el transepto, en cuya puerta se aplastó.

9. CAIDA DEL BOTAFUMEIRO desde lo alto de uno de los primeros ciclos. Este registro se encuentra en el último folio de una copia manuscrita, fechada en 1587, de un códice de la primera mitad del siglo XII, *Historia Compostelana*, crónica del turbulento Santiago de la época: "...Andando el incensario como suele en todas las fiestas solemnes... quebró la cuerda, y cayó a plomo... cayendo a los pies de los tiradores, que están siempre perpendicularmente debajo... de la rueda...".

Existe una segunda razón para los accidentes, y es posible probar que la caída de 1499 corresponde a este tipo. En ausencia de bombeo, la tensión alcanza su máximo en lo más bajo de las oscilaciones de mayor amplitud, y naturalmente se intensifica con el bombeo. La rotura de la cuerda, sin embargo, es aquí improbable. Como se estimó con anterioridad, el tirón en esa etapa alcanza sólo los 3/4 del peso combinado de los tiradores, no más allá de media tonelada; el esfuerzo sobre una cuerda de tres centímetros de grosor no excede de 70 kilogramos por centímetro cuadrado. Es cierto que, frecuentemente, y debido al impulso hacia arriba que el tirón imprime al incensario, éste asciende más allá de los 2,9 metros, y en la breve caída libre posterior la cuerda sufre un nuevo tirón, de frenado; pero en todo caso éste es mucho menor que el de la etapa del punto superior. En el accidente de 1499, fueron las cadenas de las que pende el cuerpo principal del botafumeiro las que se rompieron. Es improbable que trabajen a un tiempo más de tres cadenas; si una de ellas falla, la tensión en las otras crece en un 50 por ciento.

Una vez libre, el incensario se moverá como un proyectil. La posición, celeridad y dirección iniciales de ese proyectil, y en consecuencia su alcance sobre el suelo, dependen del ángulo entre cuerda y vertical en el instante en que queda libre. Del razonamiento expuesto más arriba se sigue que tal ángulo no hubo de ser necesariamente pequeño. Si no se tiene en cuenta la resistencia del aire, se determina fácilmente que el alcance máximo, unos 40 metros, ocurre para un ángulo de 40 grados. La resistencia reduce el alcance en un 10 por ciento. Puesto que la mitad del transepto

mide casi 33 metros, es claro que el accidente en cuestión sólo pudo ocurrir durante la etapa inferior de bombeo en los últimos ciclos.

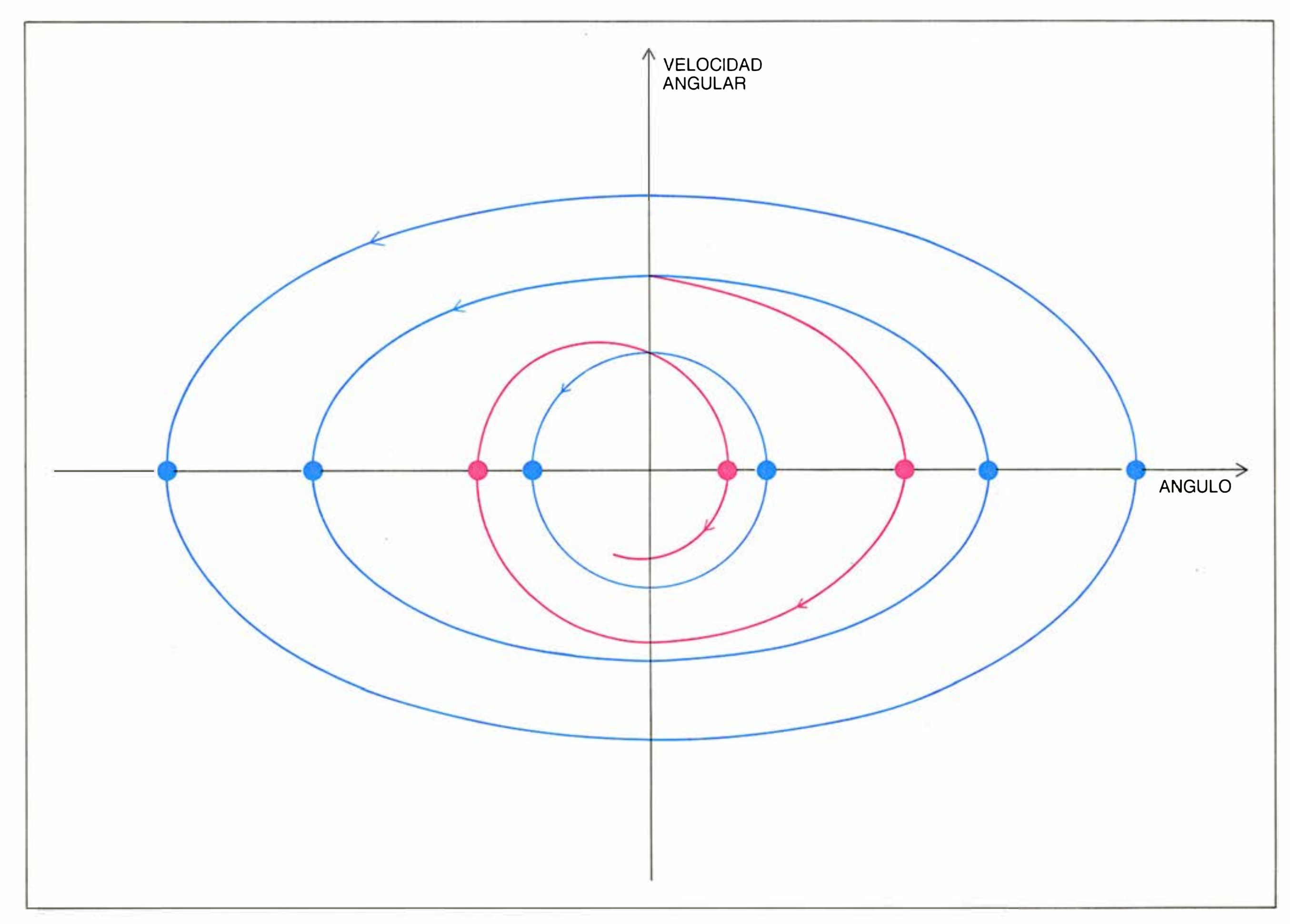
El movimiento de un péndulo ideal se representa a menudo en un diagrama de *plano de fases*, que tiene al ángulo con la vertical y a la velocidad angular como coordenadas cartesianas. Las oscilaciones periódicas del péndulo están representadas por curvas cerradas que rodean el origen, una para cada posible valor de la energía constante, tanto más exterior aquélla cuanto mayor sea ésta. En cualquier instante, el estado de movimiento corresponde a un punto en la curva, recorrida repetidamente al pasar el tiempo. Un ciclo abarca el movimiento entre dos puntos de velocidad angular nula; la amplitud es el módulo del ángulo de un punto tal.

Cuando se tiene en cuenta la resistencia del aire, la energía decrece de modo continuo y la trayectoria del punto representativo es una espiral hacia el origen, posición de reposo del péndulo. La sucesión de amplitudes decrecientes en los tiempos discretos en los que la velocidad angular se anula, describe sinópticamente la evolución de las oscilaciones. En general, se puede determinar el valor de la amplitud al final de un ciclo en función del valor a su comienzo. Esta relación determina un mapa de retorno, o de Poincaré, en virtud del cual se observa que la amplitud al término del ciclo n es igual a la función de la amplitud al término del ciclo n-1. El mapa se puede dibujar en un plano cuyos ejes coordenados corresponden a las amplitudes al final de dos ciclos consecutivos. Si se conoce el valor inicial, el mapa genera toda la sucesión iterativamente.

Si se bombea el péndulo para incrementar su energía, se necesita un espacio de fases de cuatro ejes para la representación del movimiento, ya que hay dos nuevas variables: radio pendular y velocidad radial. Sin embargo, en el caso del bombeo óptimo, esas variables vienen preestablecidas en función del ángulo y de la velocidad angular, de suerte que el espacio fásico se reduce a un plano; hay de nuevo un simple mapa de amplitudes, que ahora corresponden a velocidades angular y radial nulas, y radio mínimo.

Se han examinado y determinado ya, en el caso del botafumeiro, ganancia y pérdidas, necesarias para dibujar el mapa. En su determinación, sin embargo, se supuso que eran muy pequeñas, y se despreciaron, entre otros efectos, el peso de la cuerda; pero ello conduce a errores del 10 al 20 por ciento. Un análisis más refinado que tiene en cuenta esas correcciones genera un mapa cuyo desacuerdo con las observaciones es sólo del 2 al 4 por ciento.

La intersección de un mapa de retorno con la bisectriz de los ejes es un punto fijo de aquél. Un punto tal es localmente estable, si constituye el límite de todas las sucesiones de iteraciones con amplitud inicial en su vecindad, lo que requiere que la pendiente del mapa en el punto no exceda a la unidad. En el caso del botafumeiro, hay un punto fijo inestable a cero grados y otro estable a 85 grados; de hecho, todas las sucesiones de



10. PLANO DE FASES de un péndulo simple. A cada par de valores de ángulo y velocidad angular corresponde un punto representativo. Al pasar el tiempo, el punto describe repetidamente una curva cerrada en torno al origen, tanto más lejana cuanta mayor es la energía (*líneas negras*); la amplitud está determinada por las intersecciones con el eje horizontal (*círculos azules*). Cuando se tiene en cuenta la resistencia del aire, el punto describe una espiral hacia el origen (*línea roja*), generando una sucesión de amplitudes decrecientes. Si se bombea el péndulo, la sucesión puede ser creciente.

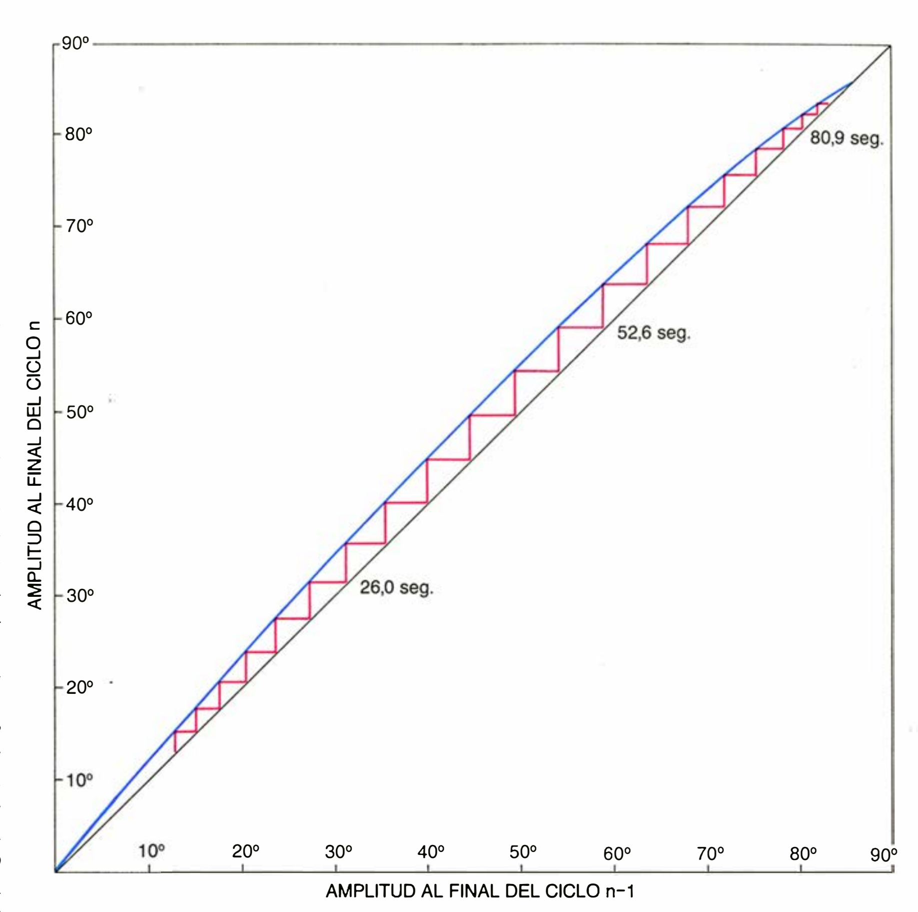
valor inicial no nulo convergen en 85 grados. Comenzando con una amplitud de 13 grados, los cálculos muestran que hacen falta 18 ciclos y unos 80 segundos para sobrepasar los 80 grados. Basta recordar los datos de observación, para concluir que los resultados del análisis son satisfactorios. El botafumeiro aparece como un oscilador paramétrico, que sostiene oscilaciones permanentes a una sola amplitud, para la cual pérdidas y ganancias se compensan.

Se ha esclarecido modernamente que los mapas de muchos sistemas físicos sencillos no sólo carecen de puntos fijos estables, sino que presentan un comportamiento "caótico determinista", a tenor del cual no es posible, en principio, ante un problema dado, predecir la trayectoria fásica para tiempos indefinidamente largos. Naturalmente nunca hay precisión completa sobre el punto fásico inicial. En un sistema caótico, trayectorias que parten de puntos próximos se separan con el paso del tiempo y dan lugar a resultados diferentes que impiden su predicción; y ello de un modo radical: un aumento progresivo de la precisión inicial conduce a un alargamiento relativo del tiempo de predicción progresivamente decreciente.

Se sabe, sin embargo, que sólo los sistemas con espacios de fases de tres o más ejes presentan comportamientos caóticos. En particular, el péndulo bombeado óptimamente no puede ser caótico (lo que no es extraño: ¡columpios e incensario funcionan!). Obsérvese que la situación cambia cuando se trata de un bombeo que siga una ley temporal previamente dada, explícita. Como la frecuencia pendular varía con su amplitud, el radio y la velocidad radial no quedan predeterminados en función del ángulo y velocidad angular; hay más de dos ejes fásicos y no es posible, en principio, excluir la aparición de caos. Ocurre otro tanto si, en vez de bombear, se empuja el péndulo. Recientemente, se comprobó que el péndulo, bajo una u otra excitación de ley temporal dada, exhibe caos si la excitación no es excesivamente débil.

Se ha venido suponiendo que el plano de oscilación estaba fijado. Pero si ese plano puede rotar (péndulo "esférico"), el espacio fásico presenta más de dos ejes, incluso bajo excitación óptima; surge, de nuevo, la posibilidad de movimiento caótico. El botafumeiro, sin embargo, se mantiene sensiblemente en el plano perpendicular al eje de los tambores. Cabe señalar, no obstante, que ayudan a ese propósito dos guías que cuelgan del armazón, por articulaciones, para reducir el rozamiento; y que en cierta ocasión, en este siglo, el incensario se desvió de aquel plano y golpeó una columna del transepto. Esto suscita dos cuestiones de interés. ¿Puede ser caótico, en el sentido moderno, el movimiento esférico del incensario bajo excitación óptima? ¿Se descubrió, siglos atrás, que ese caos desaparecía si se restringía el movimiento lateral? En otras palabras, ¿se introdujeron las guías en cierto momento del pasado tras observar la aparición de oscilaciones erráticas? No puede haber duda de que se hubiera considerado indeseable cualquier movimiento errático: sería difícil una acción eficaz de bombeo, el botafumeiro estaría propenso a accidentes y el movimiento mismo aparecería inapropiado para un servicio litúrgico.

En la actualidad sólo se dispone de una respuesta parcial a esas cuestiones. En 1984 se probó que un péndulo esférico empujado en una dirección dada y siguiendo una ley temporal prefijada podía manifestar un comportamiento caótico por muy pequeña que fuera la excitación. Y muy recientemente se llegó al mismo resultado para una excitación no prefijada, *sino de ciclo óptimo*. El caso del botafumeiro, al que se bombea y no empuja, puede exigir la consideración de los efectos que el diámetro no nulo de los tambores introduce en el problema.



11. MAPA DE RETORNO del botafumeiro (*línea azul continua*). El mapa relaciona las amplitudes al término de dos ciclos consecutivos y, dado un valor inicial, determina toda la sucesión de amplitudes. La intersección con la bisectriz de los ejes (*línea negra discontinua*) es un punto fijo estable: la pendiente del mapa es menor que la unidad; todas las sucesiones posibles convergen en él. La sucesión dibujada (*línea roja*) corresponde a la amplitud inicial observada, en torno a los 13 grados; los tiempos al final de los ciclos 6, 12 y 18 están señalados en segundos. Los tiradores del incensario necesitan 17 ciclos y 80 segundos para alcanzar una amplitud, máxima, de unos 82 grados.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

O BOTAFUMEIRO DA CATEDRAL COMPOSTELAN. J. Carro García, en *Nos-boletín Mensual de Cultura Gallega*, vol. 109, págs. 6-10; 1933.

O BOTAFUMEIRO: PARAMETRIC PUMPING IN THE MIDDLE AGES. J. R. Sanmartín, en *American Journal of Physics*, vol. 52, págs. 937-945, 1984.

RESONANT MOTION OF A SPHERICAL PENDULUM. J. Miles, en *Physica D*, vol. 11, págs. 309-323; 1984.

CHAOS IN A COHERENTLY DRIVEN SPHERICAL PENDULUM. J. R. Sanmartín y N. de Paola (en preparación).

La evolución del campo magnético terrestre

El movimiento del hierro fundido en el núcleo externo crea las condiciones que generan el campo magnético terrestre. La cartografía de la actividad magnética en el núcleo relaciona este flujo con la evolución del campo

Jeremy Bloxham y David Gubbins

¿Qué condiciones reinan en el núcleo externo, situado a 1200 kilómetros del centro de la Tierra? Las temperaturas alcanzan las de la superficie del Sol (5800 grados Celsius) y las presiones superan el millón de atmósferas. Alrededor del núcleo interno sólido circula hierro fundido, actuando como una dinamo que genera el campo magnético terrestre. Oleadas de hierro líquido, que fluye con la facilidad del agua y conduce la electricidad mejor que el cobre, levantan tempestades magnéticas. En la misma superficie de la Tierra, a 3000 kilómetros del núcleo externo, estas tempestades pueden detectarse por las variaciones de intensidad del campo magnético terrestre.

Obviamente, los geofísicos que pretenden explicar y pronosticar los cambios del campo magnético deben entender qué ocurre en el núcleo externo. A diferencia de los meteorólogos, los geofísicos no parten de observaciones realizadas durante la corta escala de tiempo de su propia vida, ya que las perturbaciones magnéticas invierten décadas en desarrollarse y persisten durante siglos, mientras que las tormentas atmosféricas surgen en cuestión de horas y duran días. Afortunadamente, los estudiosos del tema han registrado los cambios del campo magnético terrestre durante más de 300 años.

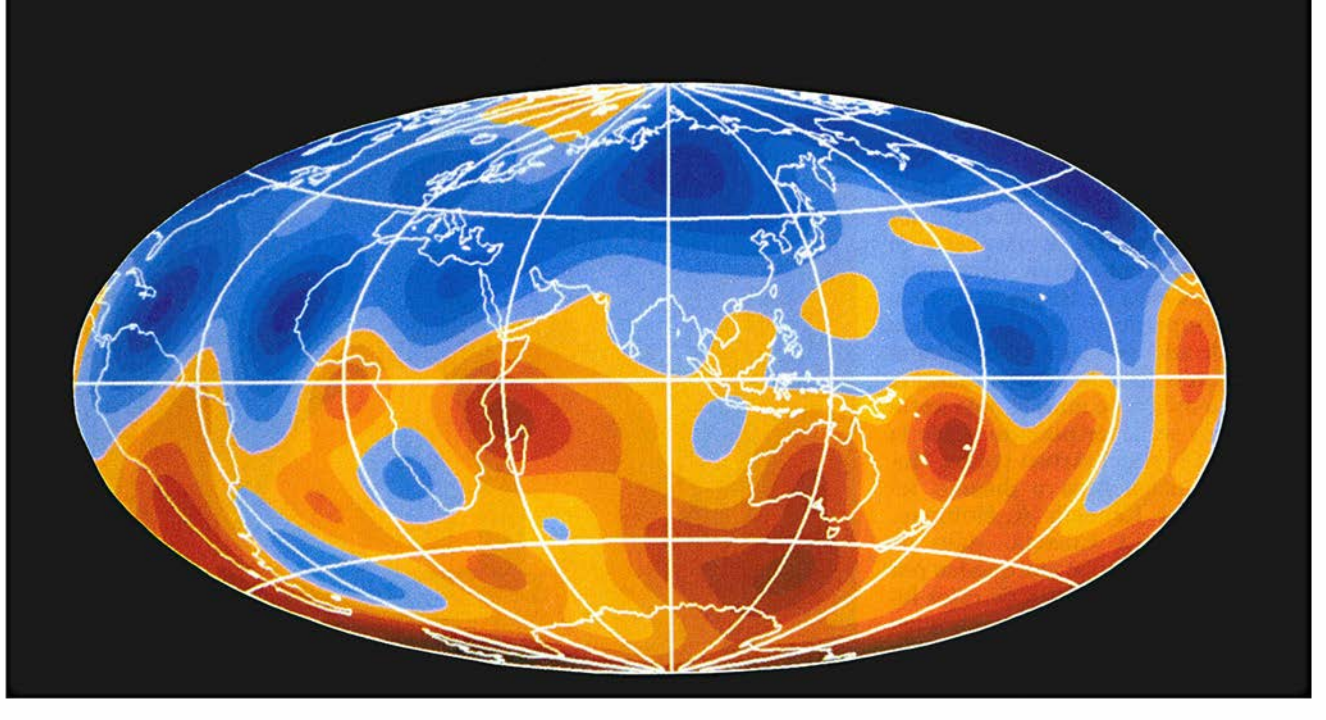
En los últimos nueve años nuestro grupo ha estudiado con detalle la información que proporciona el registro histórico, labor que hemos realizado primero en la Universidad de Cambridge y, posteriormente, en las de Harvard y Leeds. En 1983 el grupo consiguió, por extrapolación de los datos históricos, cartografiar el campo magnético en la frontera entre el núcleo y el manto [*véase la figura 1, a la derecha*]. Desde entonces, estos mapas han revelado características importantes y desconocidas del campo magnético terrestre y han ilustrado el proceso que mantiene dicho campo: la geodinamo.

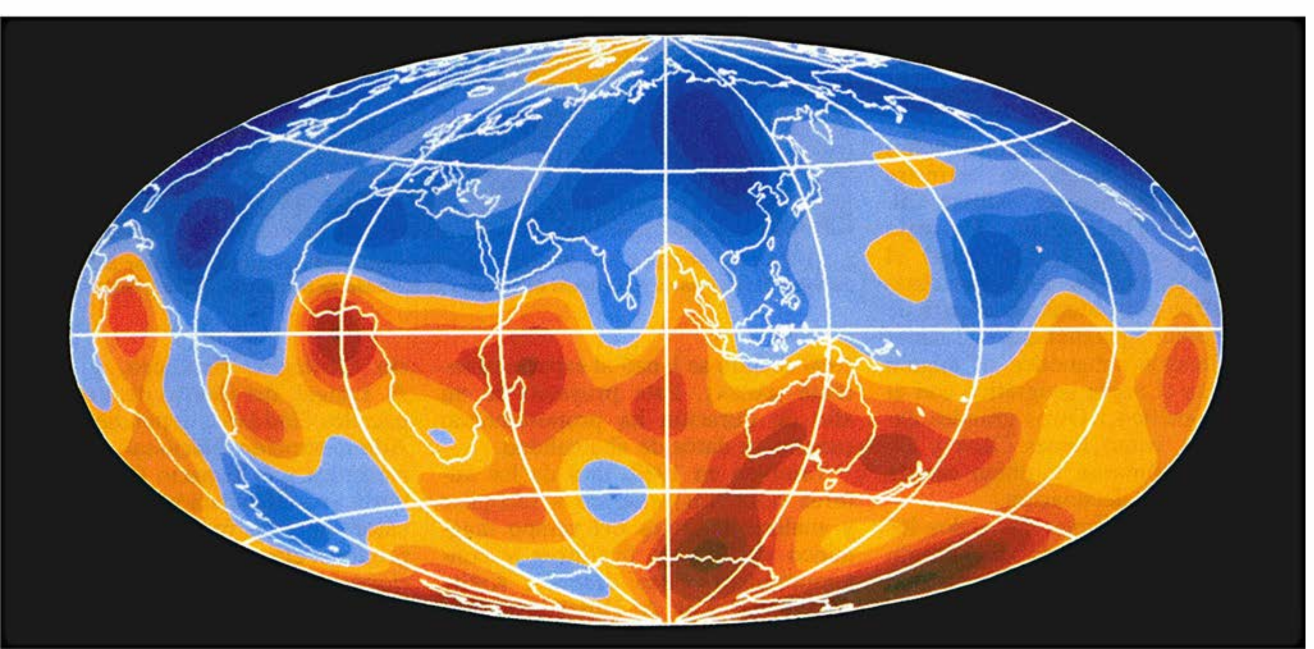
Las características básicas de la geodinamo se conocen desde los años cincuenta. Bajo la influencia de la rotación y del calor de la Tierra, el hierro fundido circula por el núcleo externo e interacciona con el campo magnético terrestre, cuya presencia podemos considerar continua durante el tiempo geológico. Esta interacción genera una corriente eléctrica, del mismo modo que se induce una corriente en una espira que se moviera en presencia de un imán. Una vez establecida la corriente, ésta crea, a su vez, un campo que refuerza el campo magnético terrestre. La geodinamo se autoalimenta, con lo cual el proceso se perpetúa. Mientras duren las fuerzas que resultan tanto de la rotación de la Tierra como de su energía térmica, responsables de la circulación del fluido conductor en torno al núcleo, aparecerán corrientes eléctricas y se desarrollará el campo magnético.

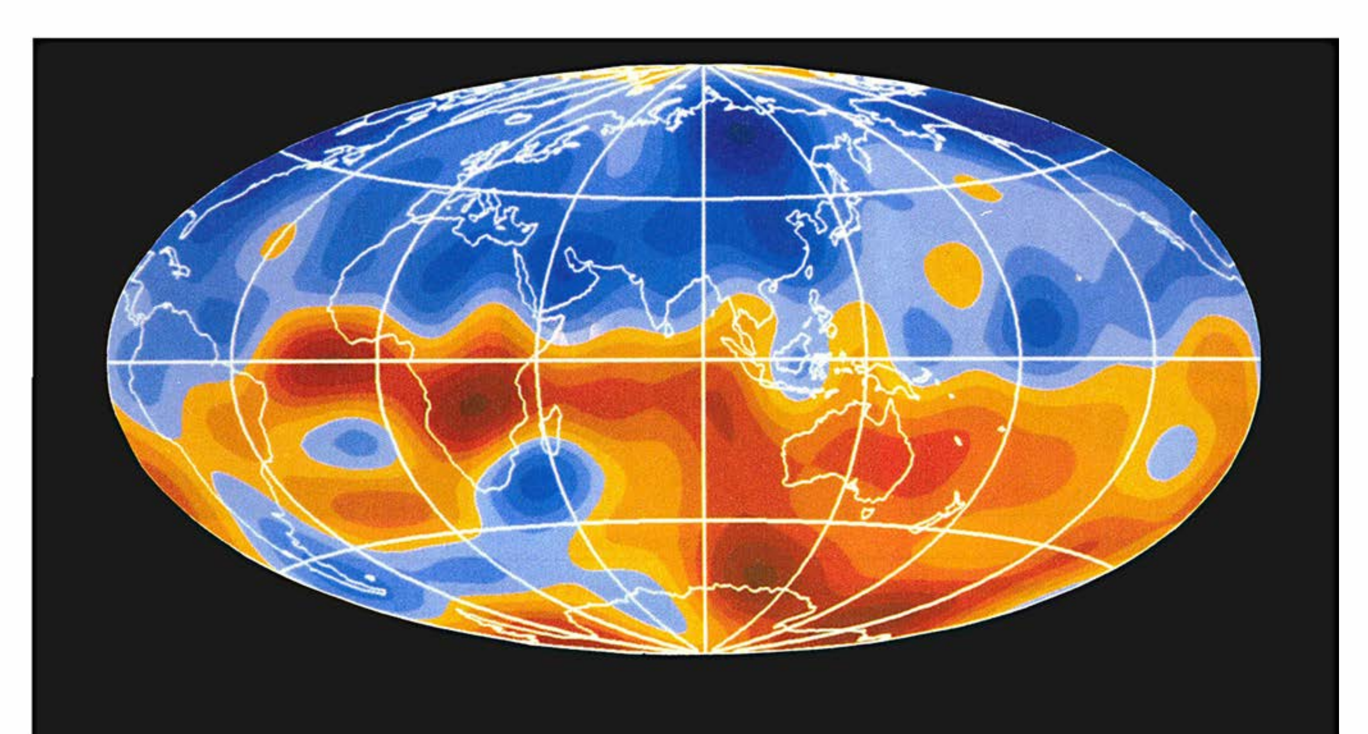
Estas sencillas ideas sobre la geo-

1. CAMPO MAGNETICO TERRESTRE proyectado en la frontera entre el núcleo y el manto (*a la derecha*) a partir de mediciones realizadas en la superficie terrestre durante los años 1777, 1882 y 1980 (*de arriba abajo*). La intensidad del color representa la intensidad del flujo magnético perpendicular a la superficie del núcleo: el número de líneas de fuerza magnética que entran o salen de su superficie. El color azul indica flujo entrante; el rojo y el amarillo muestran el flujo saliente. En la ilustración de esta página se señalan varias regiones de flujo magnético. Durante los dos últimos siglos, cuatro de estas regiones de flujo elevado han permanecido estacionarias: dos en las proximidades del polo Norte del núcleo y dos cerca del polo Sur. En el hemisferio Sur, tres zonas de flujo invertido acompañadas por regiones de alto flujo se han desplazado hacia el Oeste y hacia el Sur.

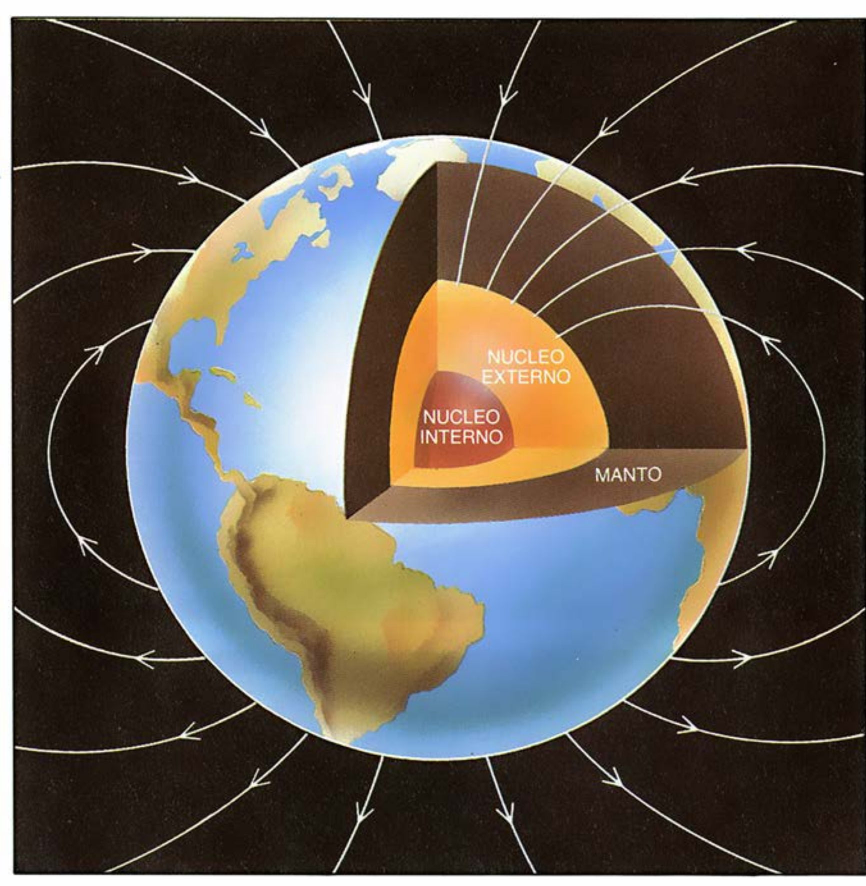
JEREMY BLOXHAM y DAVID GUBBINS han colaborado desde 1980 en investigaciones sobre el campo magnético terrestre. Bloxham es profesor de geofísica en la Universidad de Harvard. Se doctoró en 1986 por la de Cambridge, donde Gubbins impartía cursos de doctorado. En la actualidad, Gubbins enseña geofísica en la Universidad de Leeds. Recibió el doctorado en Cambridge, tras preparar su tesis en el laboratorio de Sir Edward C. Bullard, en 1972.







dinamo proporcionan una noción intuitiva acerca del origen del campo, mas no pueden explicar muchos de los lentos cambios que se han detectado. De década en década, por ejemplo, el campo se debilita cerca de un uno por ciento y, en algunas regiones, gira cosa de un grado en relación a la superficie de la Tierra. Cada millón de años, más o menos, el campo invierte su polaridad. Así, durante el último millón de años el polo norte magnético se ha desplazado desde la Antártida hasta el Artico [véase "Inversiones magnéticas y dinamo terrestre", por Kenneth A. Hoffman, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1988]. A pesar de que aún quedan por explicar muchos aspectos de estos fenómenos, los mapas del campo magnético en el límite núcleo-manto están impulsando vigorosamente el desarrollo de teorías geomagnéticas muy finas, y pueden servir para profundizar en nuestro conocimiento sobre el campo magnético del Sol y de otros planetas.



2. LINEAS DE FUERZA MAGNETICA, que representan el campo en el exterior del núcleo (*izquierda*). La tangente a estas líneas de campo y la densidad de las mismas indican, respectivamente,

Las primeras investigaciones sobre el campo magnético terrestre datan de 1600, cuando William Gilbert publicó *De Magnete*. Un siglo después, Edmund Halley peinó el océano Atlántico en un extraordinario esfuerzo por obtener una carta de declinaciones magnéticas. (Llámase declinación magnética al ángulo que forma el norte geográfico con el norte magnético.) Otros grandes exploradores, como James Cook y James Ross, tomaron también cuenta detallada de la declinación.

Durante los últimos dos siglos los investigadores han ido mejorando progresivamente la calidad y cantidad de mediciones del campo magnético terrestre y han establecido observatorios geomagnéticos por todo el globo. Ese empeño medidor culminó en 1980 cuando se lanzó al espacio el satélite MAGSAT. Este proyecto de un año de duración ha proporcionado cuantiosos datos de alta calidad.

También en 1980, uno de los autores (Gubbins) empezó a recopilar y analizar registros del campo magnético de fuentes históricas y contemporáneas. Poco después, Kathy A. Whaler, Ken A. Hutcheson, Andrew Jackson y el otro autor (Bloxham) se integraron en el proyecto. David R. Barraclough, del Servicio Geológico Británico, y Robert A. Langel, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard, dependiente de la Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio (NASA), aportaron una información de inestimable valor sobre las fuentes de datos. Las primeras etapas del proyecto proporcionaron un registro, de 380 años, del campo magnético sobre la superficie terrestre.

Los mapas revelaron características y rasgos bien conocidos del campo.

IMPULSOS GEOMAGNETICOS
AÑOS



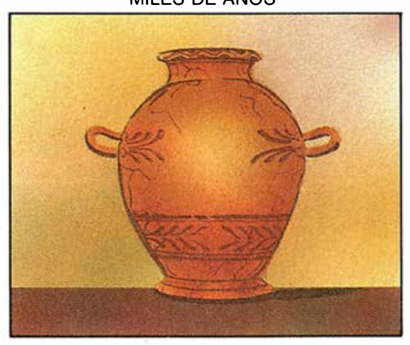
OBSERVATORIOS

DERIVA HACIA EL OESTE
CIENTOS DE AÑOS



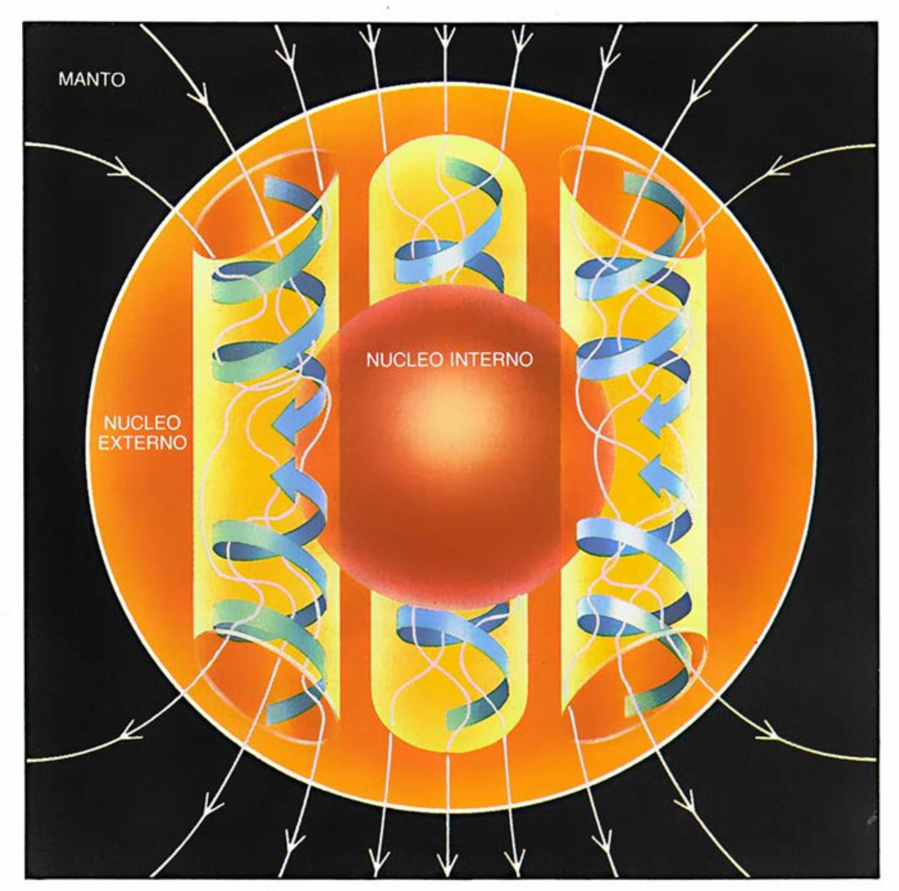
REGISTROS DE NAVEGACION

CAMBIOS EN LA COMPONENTE DIPOLAR DEL CAMPO
MILES DE AÑOS



UTILES ARQUEOLOGICOS IMANTADOS

3. VARIACIONES del campo magnético; se producen en diferentes escalas temporales. Cada tipo de variación puede inferirse de las fuentes de información que se muestran en la parte inferior de la figura. El manto apantalla algunas señales electromagnéticas que se originan en el núcleo



la dirección e intensidad de la fuerza magnética. Se muestra una posible configuración del campo y de las corrientes de fluido en el núcleo deducida a partir de mapas del campo magnético (*derecha*).

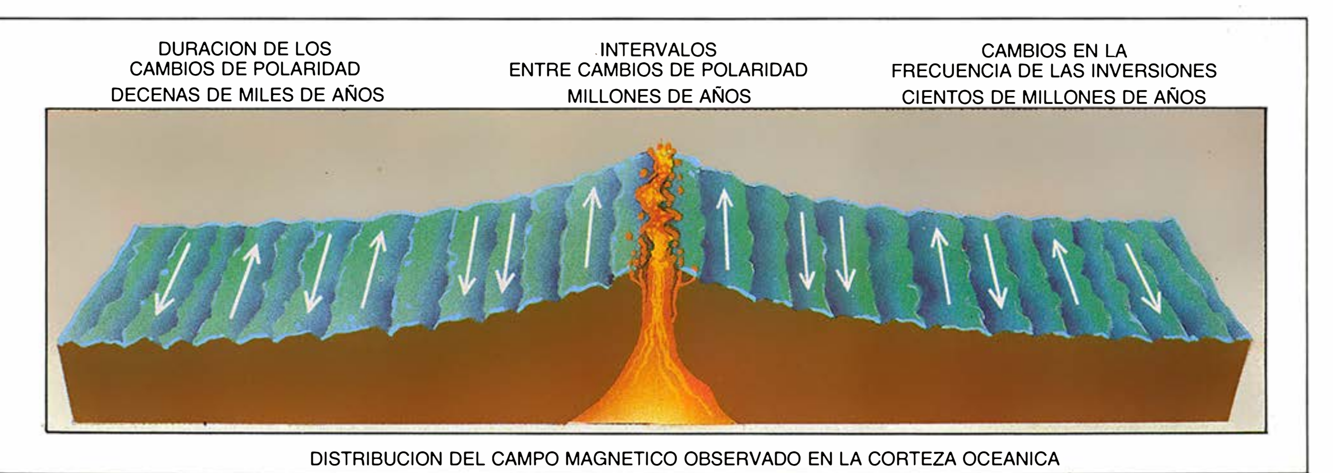
Este es similar al que produciría una enorme barra imantada y alineada con el eje de rotación de la Tierra, o equivalentemente, una descomunal corriente eléctrica alrededor del Ecuador. Este campo tiene dos polos en donde su magnitud es mayor; es, pues, un campo dipolar.

El campo magnético puede representarse por medio de líneas de fuerza magnética. Estas líneas describen trayectorias curvas, la mayoría de las cuales emergen en las proximidades del polo Sur y entran por los alrededores del polo Norte. La tangente a una línea de campo indica la dirección de la fuerza magnética; la densidad de las líneas señala la intensidad del campo magnético.

Los mapas del campo magnético terrestre en la superficie revelan la "variación secular", una expresión amplia que se predica de los cambios del campo magnético terrestre producidos durante períodos que pueden oscilar desde décadas hasta decenas de miles de años. Entre los cambios más notables destacan la disminución en la componente dipolar y la deriva hacia el Oeste del campo magnético. La componente dipolar del campo terrestre era, hace 2000 años, bastante más fuerte que ahora. (Esta disminución en la componente dipolar se manifiesta con nitidez en el estudio de cerámicas romanas, que contienen partículas de hierro mucho más imanadas que las de los útiles modernos de cerámica.) Si el campo siguiera debilitándose al paso que lleva, su componente dipolar alcanzaría un valor cero en un plazo de dos milenios. La deriva hacia el Oeste fue observada por Halley en el océano Atlántico. Allí, la línea de declinación magnética nula (la línea a lo largo de la cual la aguja de la brújula señala directamente al norte geográfico) se ha movido constantemente hacia el Oeste durante el curso de varios siglos.

Para entender los orígenes del debilitamiento del dipolo y la deriva hacia el Oeste, es necesaria una representación del campo magnético cerca de su fuente: el núcleo externo. El campo magnético en el interior del núcleo externo queda enmascarado por el fluido conductor de su superficie. Pero sí cabe inferir el campo magnético en el límite entre el núcleo y el manto.

Las mediciones del campo en la superficie de la Tierra pueden proyectarse sobre la superficie del núcleo aplicando métodos matemáticos ideados a principios del siglo XIX. No obstante, sólo en los últimos años ha sido posible llevar a cabo esta proyección de manera fiable. Las complicaciones no provienen de la falta de conocimientos físicos: la corteza y el manto son malos conductores, así que –en general– no crean ni apantallan campos magnéticos. Las dificultades ra-



externo, por lo que no pueden observarse variaciones que tengan un período inferior a un año. En períodos que cubran más de un año se puede observar un impulso geomagnético ("geomagnetic jerk"). Estos impulsos son bruscos cambios en la aceleración de las estructuras del campo magnético.

dican en los microrrasgos del campo en la superficie terrestre, espúreos o reales, que tienden a convertirse en grandes anomalías al proyectarlos sobre el núcleo.

Nuestro grupo, junto con Robert L. Parker, George E. Backus y Loren Shure, de la Institución Scripps de Oceanografía, desarrolló un método matemático que permite encontrar, a partir de las medidas determinadas en la superficie terrestre, el mapa del núcleo menos complicado. En 1983 aplicamos el método a las observaciones más recientes, ya que éstas presentaban menores dificultades. Desde entonces, el grupo ha proyectado casi todos los datos de los últimos 380 años, obteniendo una serie de mapas del campo en el límite núcleo-manto.

Los mapas muestran el número de líneas de campo que penetran en la superficie del núcleo, es decir, el flujo que atraviesa la superficie. Hemos coloreado los mapas de azul y rojo. La intensidad del color azul representa la magnitud del flujo de líneas de campo que entran en la superficie, o flujo entrante; la intensidad del color rojo indica la magnitud del flujo saliente.

Si el campo magnético en el núcleo fuera el de un simple dipolo alineado con el eje de rotación de la Tierra, el mapa se tornaría más azul hacia el polo Norte y más rojo hacia el polo Sur. Tal situación señalaría que el flujo más intenso se da en los polos geográficos. Además, el Ecuador de la superficie del núcleo coincidiría con la frontera entre las zonas roja y azul, debido a que el Ecuador magnético coincidiría con el ecuador geográfico. (El Ecuador magnético designa la línea a lo largo de la cual el campo ejerce únicamente una fuerza paralela a la superficie. Se denomina curva de flujo nulo porque en la porción de superficie determinada por esa curva no entra ni sale flujo alguno.)

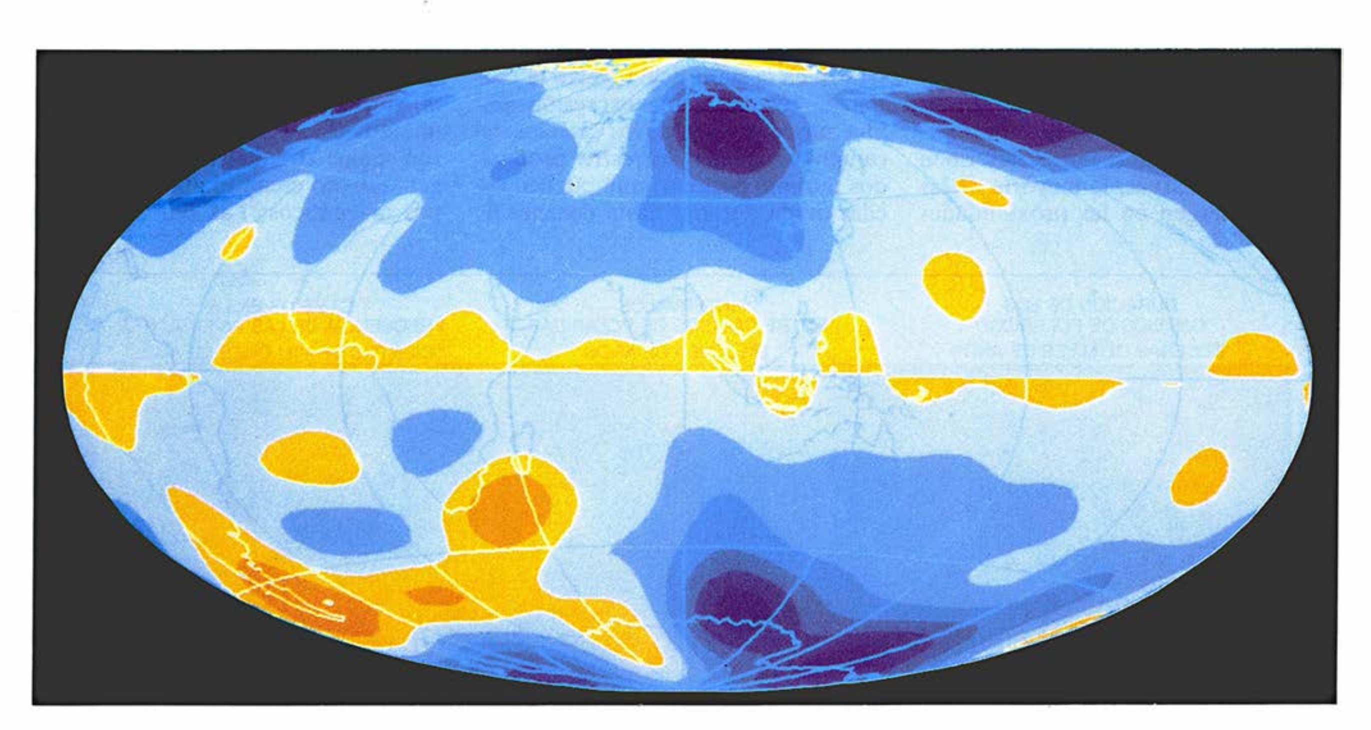
Un mapa basado en mediciones de satélite realizadas en 1980 revela que el campo geomagnético en la superficie del núcleo comparte algunas características con el campo dipolar. El mapa es fundamentalmente azul en el hemisferio Norte y rojo en el hemisferio Sur. Además, el Ecuador magnético, o curva ecuatorial de flujo nulo, se encuentra cerca del Ecuador geográfico.

Sin embargo, el campo en la superficie del núcleo difiere de un campo dipolar en muchos aspectos. En el mapa de 1980 aparecen siete curvas de flujo nulo, además de la del Ecuador magnético. Estas curvas delimitan en el mapa las fronteras entre regiones azules y rojas (fronteras entre flujo entrante y flujo saliente). Debajo del Atlántico sur aparece una mancha de color azul oscuro que indica la presencia de un intenso flujo entrante. Esta región constituye un ejemplo de zona característica de flujo inverso. En el mapa se observan también otros rasgos del campo, como son las zonas de alto y bajo flujo magnético, es decir, regiones donde el flujo es mayor o menor que el esperado de un campo dipolar.

¿Cómo se relacionan estas observaciones del campo en la superficie del núcleo con las realizadas en la superficie terrestre? Esta cuestión va ligada a tres grandes interrogantes: el origen de la componente dipolar del campo magnético terrestre, la causa del debilitamiento dipolar y las fuerzas que subyacen tras la variación secular (incluida la deriva hacia el Oeste). Investigando estas y otras cuestiones se puede empezar a entender por qué la información sobre el campo magnético en la superficie del núcleo está configurando una nueva teoría de la geodinamo.

Nuestro grupo descubrió que la mayor contribución al campo dipolar procedía de cuatro regiones de la superficie del núcleo [*véase la figura 4*]. Estas regiones se distribuyen simétricamente respecto al Ecuador. (Sus centros se localizan en la intersección entre las líneas de 60 grados Norte, 60 grados Sur, 120 grados Este y 120 grados Oeste.) El emplazamiento de estas regiones no ha cambiado mucho a lo largo de la historia, lo que sugiere que desempeñan un importante papel, a largo plazo, en la configuración del campo magnético.

Dichas regiones se encuentran cerca de zonas polares de bajo flujo que contribuyen poco al campo dipolar. Interesa señalar que estas zonas polares tienen el mismo diámetro que la proyección del núcleo interno sobre la superficie del núcleo externo. Esta observación parece concordar con los



4. COMPONENTE DIPOLAR del campo en la superficie del núcleo; es más fuerte en las regiones dibujadas, aquí, de color azul oscuro. El flujo magnético entrante en el hemisferio Norte y el flujo saliente en el hemisferio Sur contribuyen a la creación del campo dipolar. Si el campo terrestre fuera dipolar, el mapa mostraría zonas de color azul oscuro en los polos y se tornaría más claro hacia el Ecuador. (Ilustración de los autores.)

trabajos de Friedrich H. Busse y de sus colegas de la Universidad de California en Los Angeles. En 1973 construyeron un modelo compuesto por dos esferas: una pequeña que rotaba en el interior de una segunda, mayor y llena de agua. Hallaron que las corrientes de líquido por encima y debajo de los polos de rotación de la esfera interior eran más débiles que en otras áreas. Si las corrientes de fluido que existen en el núcleo externo de la Tierra fueran similares a las del modelo, sería de esperar que el campo resultara más débil alrededor de los polos.

A partir de los trabajos de Busse y de los nuestros, dedujimos las características de las corrientes de fluido dentro del núcleo. Las cuatro regiones cuya contribución al campo dipolar es más fuerte constituyen, así pensamos, los extremos superior e inferior de dos columnas de fluido. Parece probable que estas columnas (y quizás una tercera) rocen el núcleo interno y corran paralelas al eje de rotación de la Tierra [*véase la figura 2*]. Creemos que el fluido desciende, girando en espiral, a lo largo de ambas columnas, y crea, de ese modo, un proceso de dinamo que concentra el flujo magnético en el interior de las columnas. Si esta teoría se confirma, podremos relacionar directamente las corrientes de fluido en el núcleo externo con el campo magnético en el límite núcleo-manto.

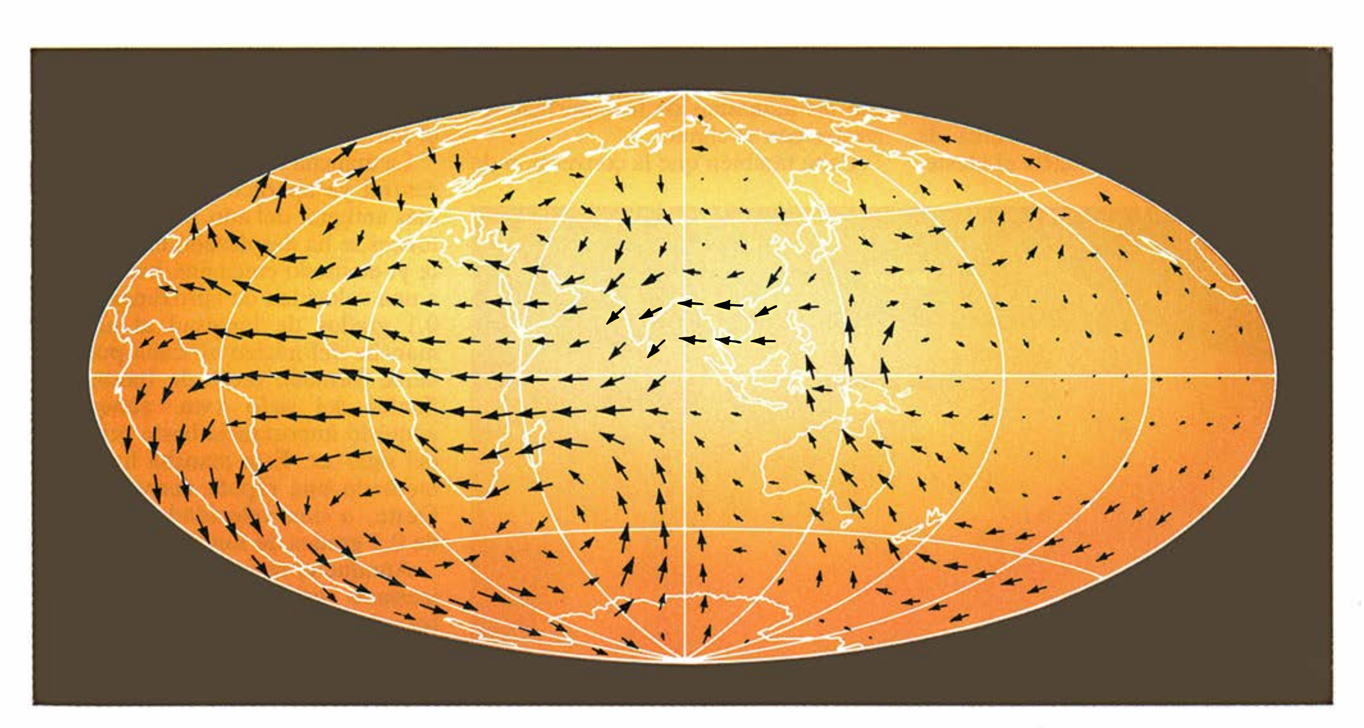
Aunque prometedora, esta teoría es incompleta. No explica la variación secular ni, en particular, la deriva hacia el Oeste. Durante las cuatro últimas décadas, dos han sido las principales explicaciones ofrecidas. En 1950, Sir Edward C. Bullard y sus colegas de la Universidad de Cambridge sugirieron la existencia de fuerzas electromagnéticas que desplazaban el núcleo hacia el Oeste respecto a la corteza y al manto.

La segunda teoría, que se suele atribuir a Raymond Hide, de la Oficina Meteorológica del Reino Unido, postula que la deriva hacia el Oeste se origina a partir del movimiento ondulatorio de fluidos en el núcleo. A diferencia de la primera, la teoría ondulatoria podría explicar la deriva hacia el Oeste, aun cuando el fluido del núcleo no rotara respecto al manto. Si una onda puede viajar a lo largo de una cuerda, aunque el único movimiento se imparta en sentido perpendicular a su longitud, también puede originarse una onda a partir del movimiento ascendente y descendente de fluidos.

Los mapas del campo en la superficie del núcleo parecen contradecir de plano la teoría de Bullard y, en parte, la de Hide. La teoría de Bullard precisa de una deriva hacia el Oeste omnipresente. El registro histórico del campo en la superficie del núcleo parece indicar, sin embargo, que la deriva hacia el Oeste está limitada principalmente al hemisferio Atlántico (desde 90 grados Oeste hasta 90 grados Este), donde algunos fenómenos ("zonas características") que presenta el núcleo se desplazan hacia el Oeste a velocidades de unos 10 kilómetros por año. La teoría de Hide podría resultar válida, si pudiera explicarse por qué no se propagan ondas de fluido de hierro en el hemisferio Pacífico.

Para comprender las fuerzas que impulsan la deriva hacia el Oeste y, más en general, la variación secular, tratamos de determinar la dirección de las corrientes de fluido siguiendo el movimiento del campo magnético en la superficie del núcleo. Las líneas de campo magnético se encuentran "congeladas" en el hierro líquido del núcleo. Al moverse el fluido, éste las arrastra consigo. Si se pudiera marcar una línea de campo, podríamos seguir la pista a un "paquete" de fluido que circulara alrededor de la superficie del núcleo.

En nuestro estudio utilizamos una técnica cuya historia se remonta a 1965. Paul H. Roberts y S. Scott, de la Universidad de Newcastle upon Tyne, habían propuesto un método para determinar las corrientes de fluido directamente a partir de mediciones del campo en superficie. Poco después, E. H. Vestine y sus compañeros de la Rand Corporation aplicaron el método para levantar los primeros mapas de corrientes de fluido en la superficie del núcleo. Roberts, sin embargo, comprendió que la técnica que Scott y él mismo habían propuesto era ambigua, porque en muchos casos no se pueden individuali-



5. EN LA SUPERFICIE DEL NUCLEO el fluido circula en dos regiones: una por debajo de Europa, la otra por debajo del extremo de Africa. (Las flechas representan la dirección y velocidad de las corrientes.) Ambas corrientes podrían explicar la deriva hacia el Oeste del campo, tal como se observa en la superficie terrestre. El aspecto de las corrientes está de acuerdo con la influencia del núcleo interno y de la rotación de la Tierra.

zar las líneas de campo magnético. No es posible, por ejemplo, distinguir las líneas de campo que representan un campo uniforme, como tampoco se puede seguir su curso en el tiempo. Esto llevó a Backus a investigar en 1968, en Scripps, las propiedades de las curvas donde no existe flujo magnético que atraviese la superficie (curvas de flujo nulo), para así deshacer la ambigüedad. Backus observó que se podía seguir la evolución temporal de una curva de flujo magnético nulo y, de ese modo, determinar la corriente de fluido perpendicular a la curva (pero no paralela a ella).

Recientemente se han señalado otras situaciones en las que es posible calcular la corriente de fluido. Coerte V. Voorhies, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA, demostró que el régimen de corrientes puede calcularse si permanece estacionario en el tiempo. Jean-Louis Le Mouël y sus colegas del Instituto y Observatorio de Física del Globo de Puy de Dôme, en Clermont-Ferrand, han demostrado que la corriente puede determinarse si está regida por un equilibrio de fuerzas rotacionales y de presión. Por otra parte, Whaler y David Lloyd, de Cambridge, probaron que puede calcularse también en regiones cercanas a la superficie del núcleo donde no haya movimiento ascendente ni descendente. Los investigadores trabajan ahora en las combinaciones de todas estas hipótesis plausibles.

Nosotros utilizamos métodos similares para determinar la corriente de fluido en la superficie del núcleo. En el hemisferio Atlántico encontramos que destacaban dos regímenes de circulación de fluido: uno al norte y el otro al sur del Ecuador. Cerca de éste, ambos se dirigen hacia el Oeste. Por tanto, la deriva de los rasgos característicos del núcleo hacia el Oeste, tal como se observa en el registro histórico, parece formar parte de un gran flujo de corriente en la superficie del núcleo.

Aunque estas corrientes superficiales indican la movilidad de los fenómenos ("zonas") que presenta el núcleo, no explican su origen. Bullard propuso, en 1958, un mecanismo que justificara la formación de estos rasgos característicos [*véase la figura 6*]. En su opinión, el flujo magnético entra y sale del núcleo a la par que el fluido circula desde las profundidades del mismo hasta su superficie. Durante este proceso, el fluido ascendente produce una zona de alto flujo magnético y otra zona de elevado flujo inverso, combinación denominada "mancha del núcleo" por su similitud magnética con las manchas solares. Nuestros mapas del campo en el límite núcleo-manto apoyan el mecanismo propuesto por Bullard. Tras investigar este mecanismo, hemos comprobado que explica de manera razonable la formación y el movimiento de las manchas del núcleo.

Algunas formas características del campo magnético se originan y mueven rápidamente, mientras que otras permanecen estacionarias. Este fenómeno sugiere la existencia de alguna influencia externa. Ya en 1967, Hide había propuesto que montañas invertidas, que sobresalieran del manto afirmándose en el núcleo, podrían afectar a la corriente de fluido en la superficie del núcleo, y condicionar, por tanto, el campo magnético, de manera similar a como lo hacen las montañas de la superficie terrestre con el clima.

Cabe también que la convección de calor a través del manto provoque variaciones de temperatura en la superficie del núcleo, interviniendo en la corriente de fluido y en el campo magnético. Adam M. Dziewonski y John H. Woodhouse, de la Universidad de Harvard, y Robert W. Clayton y sus colegas, del Instituto de Tecnología de California, cartografiaron las variaciones de la temperatura en el manto inferior. Hemos encontrado algunas correlaciones interesantes entre los mapas del campo magnético en el núcleo y la temperatura deducida para el manto inferior. Citemos aquí que tres de las cuatro regiones de flujo magnético que contribuyen de manera importante al campo dipolar se encuentran situadas bajo "zonas frías". Lo que sugiere que la dinamo está "engranada" en el manto. Las manchas del núcleo se originan bajo el sur de Africa, donde el manto está caliente y puede inducir un ascenso de fluido del núcleo. También existe una región que presenta flujo magnético bajo en el océano Pacífico, debajo de una zona caliente del manto; posiblemente, un lento ascenso haya barrido las líneas magnéticas, alejándolas de la región. Un anillo frío alrededor del Pacífico podría explicar la ausencia de fenómenos magnéticos en este océano.

Numerosos datos abonan la idea según la cual el drástico debilitamiento actual de la componente dipolar del campo obedece a la aparición y propagación de fenómenos de flujo magnético inverso bajo Africa y el océano Atlántico. En particular, parece que esta reducción se debe ahora al crecimiento de la mancha del núcleo africana y al movimiento hacia el Sur de la mancha atlántica.

La mancha del núcleo del Atlántico central ya aparece en nuestro mapa más antiguo, del año 1650. Desde entonces se ha desplazado hacia el Oeste y, de modo creciente, hacia el Sur, a una velocidad de aproximadamente 0,1 grados de longitud al año. La mancha del núcleo africana pudo haberse formado cerca de Indonesia a finales del siglo XVIII, aunque no adquirió importancia hasta principios del siglo XX. Esta mancha ha experimentado una rápida deriva hacia el Oeste, a una velocidad aproximada de 0,3 grados de longitud por año.

Aunque el registro histórico es demasiado corto para un estudio riguroso de un ciclo de estas zonas características de flujo, hemos intentado deducir su movimiento. Sospechamos que las manchas del núcleo se originan cerca de Indonesia y experimentan una rápida deriva hacia el Oeste a una velocidad aproximada de 0,3

MANTO

NUCLEO EXTERNO

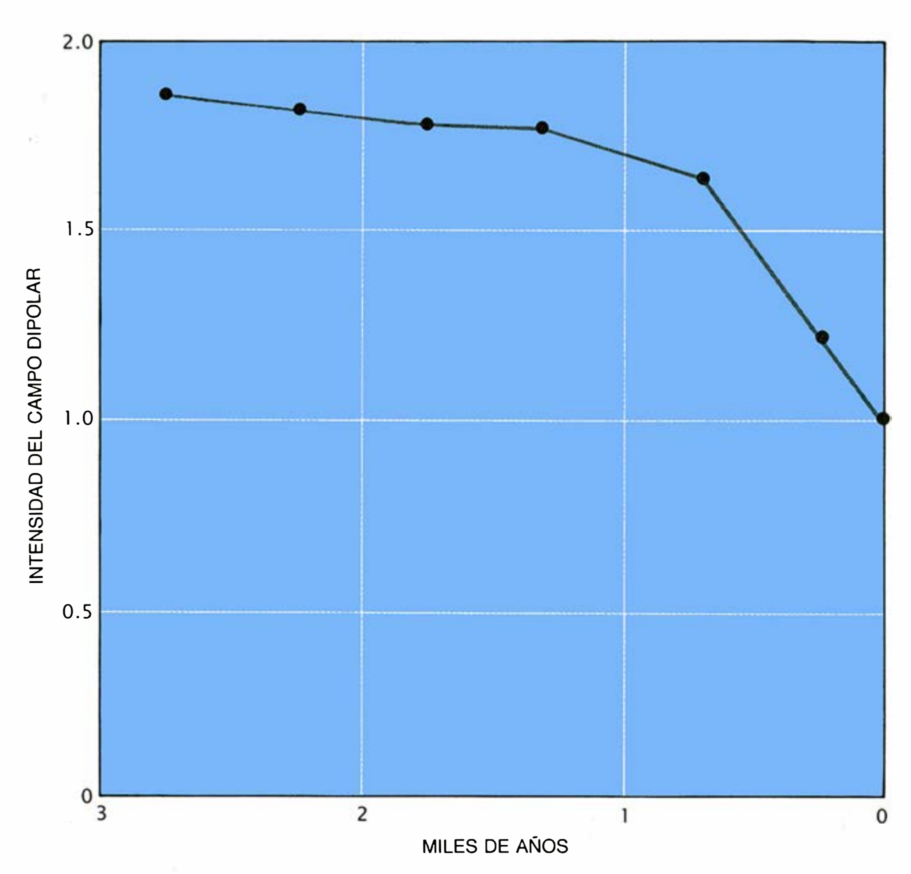
6. EL FLUIDO ASCENDENTE agrupa las líneas de campo junto a la superficie del núcleo. Las líneas asociadas con el fluido ascendente se difunden hacia arriba y hacia abajo a través de la frontera núcleo externo-manto. Este proceso crea una región de flujo saliente y otra de flujo entrante.

grados por año. Cuando llegan al sur de Africa, aumentan rápidamente en intensidad. Luego, pasan por debajo del Atlántico a una velocidad más moderada, de 0,1 grados por año, y se desplazan, de manera gradual, hacia el Sur. La actual mancha del núcleo del Atlántico se habría formado, de seguirse esta pauta, hace 900 años, y la mancha del núcleo africana hace 200. Estas consideraciones, a pesar de su carácter especulativo, explican el debilitamiento a largo plazo de la componente dipolar, tal como se observa en el registro arqueomagnético. Al moverse hacia el Sur, los flujos magnéticos inversos de las manchas del núcleo reducen el campo dipolar. Si una nueva zona característica se forma y se desplaza hacia el Oeste, tal como han hecho las manchas atlántica y africana, la componente dipolar del campo seguirá reduciéndose y podría ocurrir una inversión completa del campo magnético terrestre.

Curiosamente, el registro histórico muestra que se han originado zonas de flujo magnético inverso y que han aumentado en intensidad, pero que ninguna ha decrecido. Sin embargo, existen datos que sugieren que estas zonas decaen durante períodos de crecimiento del dipolo. Durante los últimos diez millones de años, el campo magnético terrestre ha cambiado de polaridad aproximadamente cada 500.000 años. El campo dipolar, sin embargo, decae en un plazo de tiempo mucho más corto. Esto sugiere que la polaridad del campo no se invierte después de cada período de debilitamiento del dipolo. En muchos casos, el campo dipolar que resurge al declinar las zonas de flujo magnético inverso, puede presentar la misma polaridad.

Alan V. Cox, que fue profesor de la Universidad de Stanford, propuso un modelo para explicar la ocurrencia aleatoria de inversiones de polaridad. Supuso que la intensidad de la componente dipolar del campo oscilaba. En raras ocasiones, estas oscilaciones alcanzarían las proporciones suficientes para que la polaridad del campo se invirtiera. Nosotros estamos de acuerdo con esta teoría y añadimos que las oscilaciones podrían tener su origen en el movimiento de las manchas del núcleo.

La formación de las manchas del núcleo no puede, sin embargo, explicar un aspecto sorprendente de las inversiones del campo: la polaridad del campo magnético se ha invertido en intervalos diferentes durante distintos períodos geológicos. Sabemos que durante el Cretácico, hace 90 millones de años, y el Pérmico, hace 170 millones de años, no ocurrieron inversiones, ya que las rocas que se formaron durante aquellos períodos presentan todas idéntica polaridad. Durante los últimos 90 millones de años, la frecuencia de las inversiones ha ido en progresivo aumento. Es difícil explicar este comportamiento a largo plazo del campo magnético mediante los cambios en el núcleo que hemos expuesto, ya que éstos son demasiado rápidos. Más bien, es probable que en este proceso estén involucrados los cambios que se producen en el manto sólido, puesto que presentan períodos del orden de 100 millones de años. Si la temperatura aumentara en el manto profundo, en particular bajo el sur de Africa o de Indonesia, la formación de zonas de flujo magnético inverso podría acelerarse, provocando de este modo las inversiones.



7. FRACCION DIPOLAR del campo terrestre: ha decrecido durante el último milenio. La gráfica muestra la intensidad de la componente dipolar dividida por la intensidad medida en 1980. Michael W. McElhinny y W. E. Senanyake recopilaron los datos de fuentes históricas y arqueológicas.

Los geofísicos se encuentran actualmente en situación de poder desarrollar teorías geomagnéticas más finas. Para ello, los estudios posteriores necesitarán numerosas y continuas observaciones. Los datos del MAGSAT han permitido un considerable avance de nuestros conocimientos. Sin embargo, y a pesar del notable éxito de esta experiencia, hasta el momento no se ha logrado ningún compromiso firme para futuras misiones. Por otra parte, la falta de medios constituye una amenaza para importantes observatorios magnéticos. Hoy en día, paradójicamente, se realizan menos observaciones que hace 25 años.

Pensamos que la toma de datos merece una prioridad absoluta en el estudio del campo magnético terrestre. Es esencial que las instituciones científicas de todo el mundo mantengan los observatorios magnéticos, contribuyan con nuevas instalaciones y medios y apoyen la recogida de datos desde satélites. Sería inadmisible que se frustrara el descubrimiento de una nueva zona de flujo o que se pasara por alto la evolución de una tempestad magnética o el nacimiento de una mancha del núcleo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EL NÚCLEO TERRESTRE. Raymond Jeanloz en *Investigación y Ciencia*, n.º 86, págs. 26-36; noviembre de 1983.

THE EARTH'S MAGNETIC FIELD. David Gubbins en *Contemporary Physics*, vol. 25, n.º 3, págs. 269-290; 1984.

THE SECULAR VARIATION OF EARTH'S MAGNETIC FIELD. Jeremy Bloxham y David Gubbins en *Nature*, vol. 317, n.º 6040, págs. 777-781; 31 de octubre de 1985.

Formación de sinapsis durante el desarrollo del cerebro

Durante el desarrollo del cerebro, se van perfeccionando las sinapsis entre neuronas y se establecen nuevas conexiones. Los cambios no son automáticos. ¿De qué dependen?

Ronald E. Kalil

El desarrollo del cerebro de los mamíferos es un proceso maravilloso. A partir de un grupo de células inmaduras e indiferenciadas, surge un órgano de una complejidad estructural tal que, a su lado, la mayoría de los sistemas naturales o artificiales ofrecen una elemental sencillez. A pesar de esa complejidad, en los últimos cien años los neurobiólogos han adquirido numerosos conocimientos acerca de la formación y la diferenciación de los circuitos eléctricos cerebrales durante el desarrollo embrionario y posnatal.

La mayoría de los investigadores coincidirían en afirmar que son los genes los que determinan las conexiones iniciales entre neuronas para establecer los circuitos básicos del cerebro. Sin embargo, durante años se ha discutido si realmente los genes controlan todos los aspectos de la maduración de las neuronas. Muchos investigadores sospechaban que la actividad nerviosa —en particular, la transmisión de los potenciales de acción a través de los circuitos neuronales— ayudaba a controlar aspectos tales como el número, la distribución y la eficacia de las sinapsis, zonas de comunicación entre las neuronas.

Durante los últimos 25 años, un aluvión de estudios acabó por demostrar que la actividad atípica del cerebro inmaduro podía originar conexiones anormales. Quizá resulten más sorprendentes los hallazgos de trabajos recientes en los que se ha observado que la actividad cerebral no se limita a influir en el desarrollo de las sinapsis; los potenciales de acción son, de hecho, esenciales para determinados aspectos de dicho desarrollo. En ese orden, mis colegas y yo, en la Universidad de Wisconsin en Madison y en la Universidad de Colorado en Boulder, hemos demostrado que, cuando se impide que las neuronas en desarrollo generen potenciales de acción, las estructuras llamadas sacos terminales del axón, que establecen las sinapsis, se "congelan" en un estado inmaduro: detienen su crecimiento, no establecen sinapsis nuevas y no experimentan otras modificaciones fundamentales.

La suspensión del proceso de diferenciación es necesaria, llegado cierto punto, en muchos sistemas cerebrales; por ejemplo, en una vía sensorial principal que ha alcanzado su completa maduración. De hecho, algunas de las vías que se establecen durante la gestación mantienen su plasticidad sólo durante un período limitado después del nacimiento, durante el cual la red de conexiones se va ajustando. (La duración de estos períodos críticos, así se les califica, varía de unas zonas a otras del cerebro.) Sin embargo, una vez se completa dicho proceso, las vías pierden su capacidad de transformación, lo que asegura que el sistema maduro responderá bien ante un estímulo determinado (por ejemplo, un destello luminoso).

Por otra parte, en algunos sistemas del cerebro el mantenimiento de la capacidad de modificación de las conexiones entre neuronas resulta crucial. Tal es el caso de los sistemas responsables del aprendizaje que, se supone, no pierden nunca su plasticidad; gracias a ello pueden almacenar nuevos conocimientos.

Los estudios acerca del mantenimiento de esa capacidad de transformación en los centros de aprendizaje están proporcionando datos que pueden resultar fundamentales para comprender algunos de los procesos moleculares que explican los efectos de la actividad cerebral sobre el desarrollo de las sinapsis. A tenor de ciertos hallazgos, los períodos críticos podrían ser fases en las que neuronas jóvenes de amplias zonas cerebrales comparten las características moleculares que permiten a los centros del aprendizaje modificar, de forma indefinida, sus conexiones neuronales. Existen incluso unas razones para suponer que ciertos mecanismos íntimamente relacionados podrían intervenir en el efecto de la actividad cerebral sobre la intensidad de las sinapsis, controlar la duración de los períodos críticos y prolongar la capacidad de aprendizaje toda la vida.

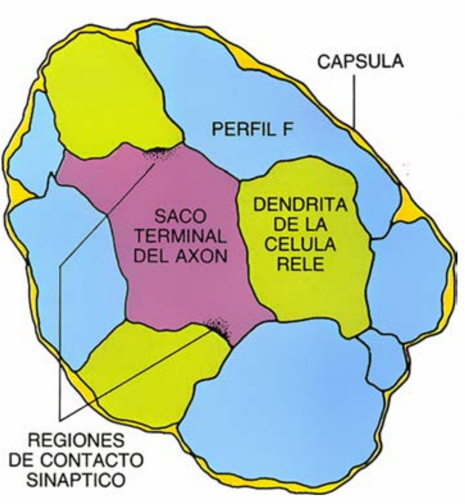
Aunque los cerebros de los mamíferos difieren en tamaño, forma y pormenores estructurales, todos siguen un proceso similar durante el desarrollo y comparten pautas de crecimiento y maduración. En una fase temprana de la gestación, un número de células se agregan para formar el tubo neural, en el que se van constituyendo capas y asociaciones de células; estas agrupaciones celulares serán, más adelante, partes especializadas del cerebro maduro.

Una vez organizadas en grupos, las

RONALD E. KALIL estudió en la Facultad de Harvard y en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. En 1973, se incorporó a la Universidad de Wisconsin en Madison, donde hoy enseña oftalmología y dirige el centro de neurociencias. Además de estudiar el papel de la actividad nerviosa sobre la formación de las conexiones sinápticas en el cerebro, Kalil investiga los mecanismos mediante los cuales los circuitos visuales del cerebro se recuperan de las lesiones.

células se diferencian mediante la extensión de prolongaciones de su cuerpo celular: un axón y múltiples dendritas. El axón, cuyo crecimiento puede alcanzar hasta decenas de centímetros, se asocia con la transmisión de señales; las dendritas, por lo general más cortas, suelen ser receptoras de señales.

Se admite que los axones en crecimiento se extienden hasta zonas específicas del cerebro primitivo siguiendo sendas señaladas químicamente, de trayectoria probablemente determinada por los genes. Cuando el extremo de un axón alcanza su destino, desarrolla un sistema de ramificaciones, cada una de las cuales presenta un saco terminal. A su vez, los sacos establecen sinapsis con dendritas u otras regiones receptoras de las

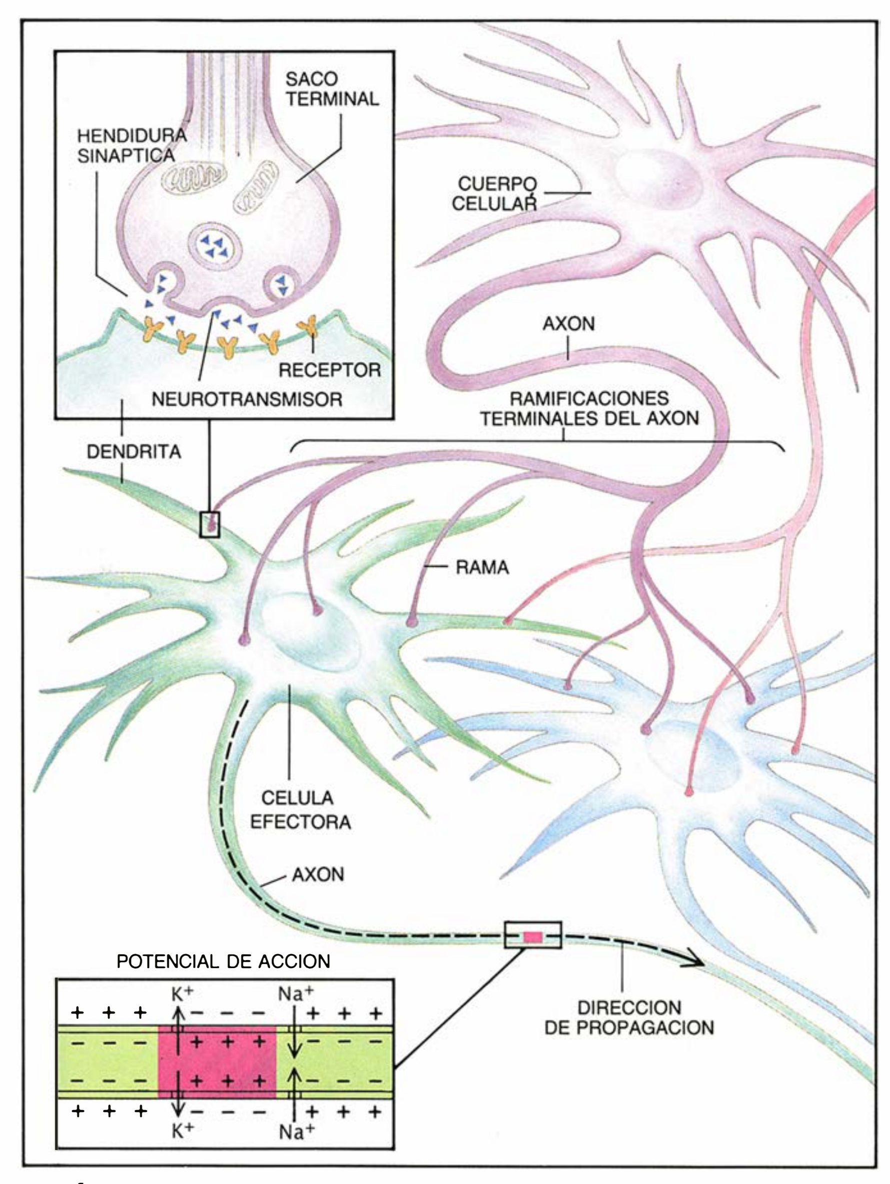


1. ZONA SINAPTICA COMPLEJA en la zona del cerebro conocida por núcleo geniculado lateral. Se trata de una más, entre muchas similares, que se forman de manera natural durante las primeras ocho semanas de vida de un gato. En el centro se observa un terminal (*en color morado en el esquema*) de un axón (prolongación transmisora de señales nerviosas) que se extiende desde una célula ganglionar de la retina ocular. En el momento del nacimiento, el tamaño de los terminales, sacciformes, es aproximadamente la mitad del que corresponde a un terminal maduro y ya han formado algunas sinapsis (lugares de comunicación) con las dendritas (prolongaciones relativamente cortas) de las células relé geniculadas (*en color verde en el esquema*). Durante las ocho semanas siguientes, los sacos terminales crecen y establecen también sinapsis con los perfiles F (*en color azul en el esquema*), apéndices especializados de las dendritas de las células geniculadas llamadas interneuronas. Los sacos y las dendritas que los rodean quedan incluidos en una cápsula (*en color amarillo en el esquema*) que limita la zona sináptica compleja. El autor ha descubierto que todo este desarrollo anatómico de las primeras ocho semanas de vida del gato depende de la presencia de unos estímulos nerviosos: los potenciales de acción. La microfotografía electrónica está tomada con unos 18.000 aumentos.

células efectoras seleccionadas. La mayoría de las sinapsis consisten en una región especializada en el saco axónico presináptico, una región receptora en una dendrita postsináptica y una estrecha hendidura entre ambas regiones. (Un axón puede establecer contacto con varias células, cada una de las cuales puede recibir señales no sólo de ese axón sino también de muchos otros.)

Establecidas las sinapsis, las señales pasan de neurona a neurona. En la mayoría de las regiones del cerebro de los mamíferos, las transmisiones son de naturaleza química. El saco presináptico libera un neurotransmisor, que se difunde a través de la hendidura sináptica y se une a las moléculas receptoras en la membrana celular de la célula postsináptica. Esta unión provoca la modificación morfológica de los receptores y activa así canales por donde entrarán en la célula o saldrán de ella ciertos iones.

El balance neto de iones en el interior del cuerpo celular (que puede recibir muchas señales a la vez) determina la inhibición o la excitación de la neurona y la generación de un potencial de acción o impulso nervioso. Estos impulsos se propagan a lo largo del axón de la célula y, si se suceden en número notable, pueden desencadenar la liberación de las moléculas neurotransmisoras de la propia célula, que actúan, a su vez, en una nueva serie de neuronas.



2. SEÑALES EXCITADORAS que recibe una célula efectora (diana); pueden originar potenciales de acción (una inversión momentánea y autolimitada de las cargas a lo largo de la superficie interna y externa de la membrana celular). Los potenciales de acción se propagan axón abajo (*flecha discontinua*), constituyendo un impulso nervioso. Estas señales suelen atravesar las sinapsis valiéndose de sustancias químicas (*recuadro superior, izquierda*): el saco terminal del axón celular libera un neurotransmisor que se difunde a través de una estrecha hendidura y se une a determinadas moléculas receptoras de la célula efectora. En virtud de esa unión, la membrana de célula postsináptica se convierte en localmente permeable a ciertos iones. Cuando se alcanza un flujo suficiente de entrada de iones sodio (Na^+) (*recuadro inferior, izquierda*), se genera un potencial de acción (*zona roja*). Entonces, el interior de la célula, que normalmente es negativo en relación con el exterior, se hace momentáneamente positivo, mientras el exterior se vuelve negativo. Casi de inmediato, un flujo concomitante de salida de iones potasio (K^+) ayuda a restaurar las cargas originales. (Recreación de Dana Burns.)

¿En qué consiste exactamente el potencial de acción? Tales impulsos, que duran menos de una milésima de segundo, son, a grandes rasgos, alteraciones momentáneas y autolimitadas del potencial de membrana (diferencia entre las cargas en el interior y a lo largo de la superficie exterior celular). En una célula en reposo, el potencial de membrana es de 70 milivolt (0,07 volt), siendo el interior de la célula negativo en relación a su exterior. Los potenciales de acción se desencadenan en la célula en reposo después de que el flujo neto de iones (la media de todas las emisiones recibidas de las células presinápticas) aumente la carga positiva en el interior del cuerpo celular lo suficiente para rebajar el potencial de membrana en unos 40 milivolt.

Cuando se alcanza ese voltaje umbral, la membrana celular se torna sumamente permeable a los iones de sodio, con carga positiva, en una región especializada del axón (en la zona donde el axón se une al cuerpo celular). Este importante flujo iónico de entrada se traduce momentáneamente en una carga positiva interna en relación con la externa. Un flujo concomitante de salida de otros iones positivos restablece el potencial de reposo casi de inmediato; mientras, el potencial de acción continúa descendiendo por el axón.

La sospecha de que el potencial de acción podría resultar crítico para el desarrollo del cerebro surgió a raíz de una amplia serie de investigaciones realizadas en los años sesenta y setenta, principalmente en relación con el sistema visual del gato. Este sistema ha sido objeto de muchos estudios, debido, sobre todo, a que buena parte de su maduración se retrasa hasta los dos primeros meses después del nacimiento, lo que permite examinar y manipular dicho sistema con relativa facilidad durante las últimas fases de desarrollo.

Las vías nerviosas ópticas del gato empiezan en las células ganglionares de la retina. Estas células transmiten la información procedente de los fo-

torreceptores retinianos hacia los núcleos geniculados laterales, que son centros del tálamo cerebral. Lo mismo que sucede en otros muchos mamíferos, las células ganglionares del lado derecho de cada ojo (que reciben las imágenes de la zona izquierda del campo visual) extienden axones hacia el núcleo geniculado lateral del hemisferio cerebral derecho; por su parte, las células ganglionares del lado izquierdo del ojo envían axones hacia el núcleo del hemisferio izquierdo [*véase la figura 3*]. A su vez, las llamadas células relé del núcleo geniculado lateral transmiten la información hasta la corteza cerebral visual de su propio hemisferio para su procesamiento.

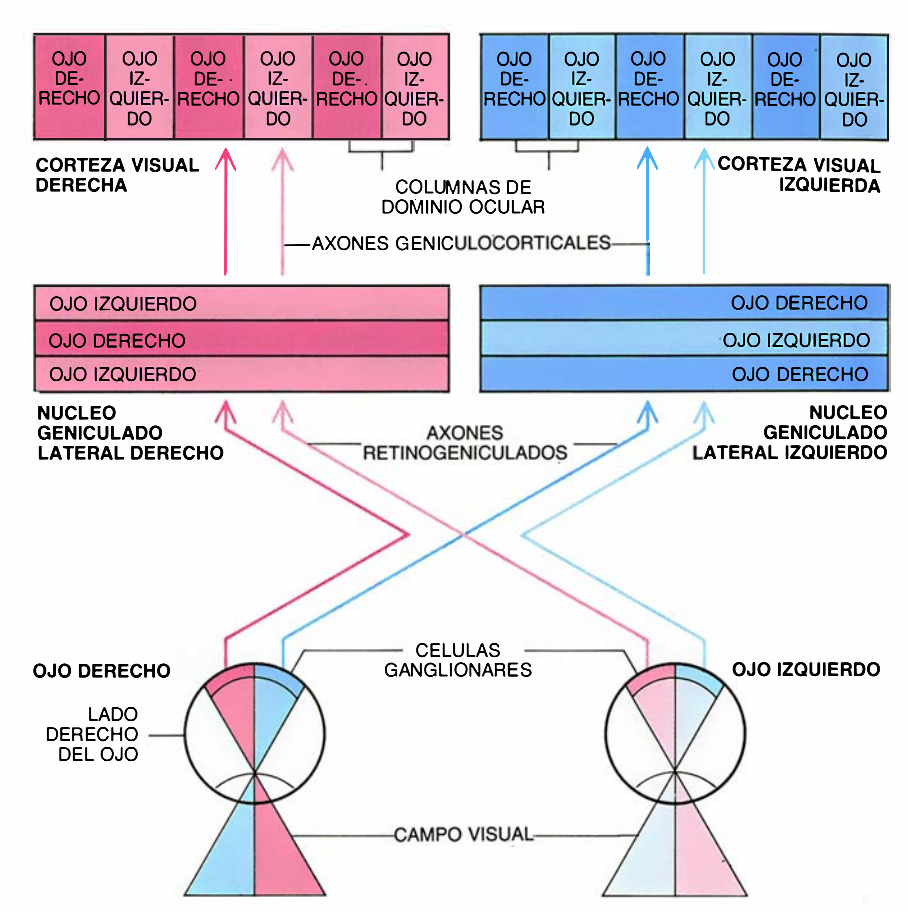
Carla J. Shatz, David W. Sretavan y Marla B. Luskin, de la Facultad de Medicina de Stanford, han descubierto gran parte de lo que se sabe acerca del desarrollo prenatal de dichas vías. Normalmente, los axones embrionarios de las células ganglionares de la retina llegan al núcleo geniculado lateral hacia la mitad de la gestación, que en el gato dura unos 63 días. En ese momento, cada núcleo lateral consiste en un agrupamiento desordenado de células.

Los núcleos experimentan grandes transformaciones durante la segunda mitad de la gestación. Las células que los constituyen se organizan en capas; luego, cada capa será sensible a las señales procedentes de un solo ojo. Esta especialización se lleva a cabo mediante la estratificación gradual de los axones retinogeniculados que llegan al tálamo procedentes de las células ganglionares de la retina. Los axones que recogen la información del ojo derecho terminan en capas específicas de las células geniculadas, mientras que los axones correspondientes al ojo izquierdo acaban en las capas adyacentes.

Unos diez días antes de que el gato nazca, los axones de las células relé del núcleo geniculado lateral alcanzan la corteza visual. Estos axones geniculocorticales terminan principalmente en la cuarta de las 6 capas primitivas del córtex. Al principio, los axones asociados al ojo derecho se solapan con los que reciben información del ojo izquierdo. Frecuentemente, ambos tipos de axones acaban en las mismas células, lo que significa que estas células efectoras, o diana, pueden estimularse por señales procedentes de ambos ojos.

Pero se trata de una situación transitoria. Simon D. LeVay, Michael P. Stryker y Shatz demostraron, en experimentos realizados en la Facultad de Medicina de Harvard, que, durante el segundo mes después del nacimiento del gato, los axones geniculocorticales se diferencian para cada ojo. Al parecer, retraen algunas de sus ramas terminales, de manera que las células corticales permanecen en contacto con células geniculadas que responden sólo ante señales procedentes del ojo derecho o sólo del ojo izquierdo. (Probablemente, los axones aumentan también la intensidad o eficacia de las sinapsis restantes, pero este aspecto no se ha comprobado todavía.)

El resultado final de esta segregación es el establecimiento de columnas de dominio ocular alternas y de dimensiones similares en la corteza. Algunas columnas de células corticales responden sólo ante señales procedentes del ojo derecho, mientras que las columnas alternas lo hacen sólo ante señales que provienen del ojo izquierdo.



3. VIAS NERVIOSAS fundamentales para la visión del gato, muy similares a las de otros mamíferos con ojos en disposición frontal. Las células ganglionares retinianas del lado derecho de ambas retinas transmiten información visual al núcleo geniculado lateral del hemisferio derecho del cerebro; los axones procedentes del ojo derecho terminan en células de la capa central del núcleo, y los axones del ojo izquierdo terminan en capas situadas por encima o por debajo de la capa central. Las células ganglionares del lado izquierdo de ambas retinas se proyectan hacia el el núcleo geniculado lateral del hemisferio izquierdo, estando los axones segregados en capas oculoespecíficas. Las células relé de cada núcleo geniculado lateral envían señales visuales hacia la corteza visual de su hemisferio. En cada hemisferio, los axones asociados con el ojo derecho terminan en columnas específicas de células corticales; los axones asociados con el ojo izquierdo terminan en columnas dispuestas de forma alterna. Esta segregación es responsable de las columnas de dominio ocular en la corteza cerebral.

En los años sesenta, Torsten N. Wiesel y David H. Hubel, de la Facultad de Medicina de Harvard, llevaron a cabo algunos de los estudios más destacados, que han contribuido a demostrar la importancia de la experiencia visual normal para que se produzca este proceso de desarrollo. Suturaban los párpados de un ojo en gatos recién nacidos. Los investigadores observaban así que, limitando la actividad de un ojo, se afectaba gravemente el desarrollo de las columnas de dominio ocular. Las mediciones de la actividad eléctrica en la cuarta capa de la corteza visual ponían de manifiesto que casi todas las células de esa zona respondían exclusivamente ante las señales procedentes del ojo destapado.

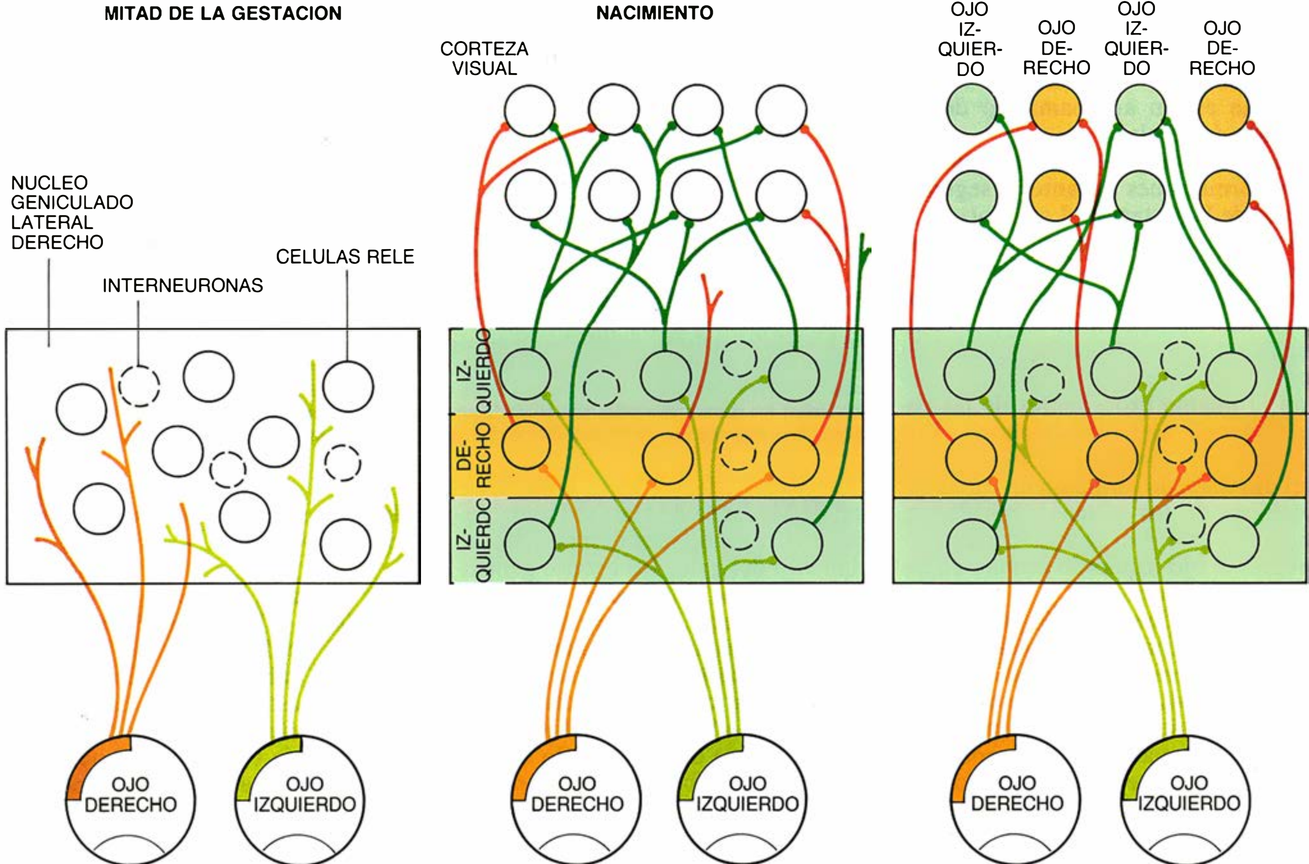
Tal anomalía cortical se explica en gran parte por el comportamiento de los axones procedentes del núcleo geniculado lateral. Mediante tinciones de estos axones, Shatz y Stryker demostraron en gatos, y Hubel, Wiesel y LeVay en monos, que los axones geniculocorticales de los animales mantenidos durante varias semanas con un ojo cerrado no se segregaban en los dominios oculoespecíficos habituales. En cambio, los axones asociados con el ojo abierto desarrollaban ramas terminales nuevas, ensanchando así su territorio en el córtex y robándole terreno a las terminales de los axones que recibían la información del ojo cerrado.

Demostrado que la actividad neuronal anormal durante el desarrollo del cerebro alteraba las interconexiones habituales del sistema visual, se intentó dilucidar si dicha actividad neuronal era necesaria para el desarrollo del entramado nervioso. Cabía la posibilidad de que se produjera parte del desarrollo sináptico incluso en ausencia de potenciales de acción, lo que significaría que algunos aspectos del desarrollo se hallarían bajo control genético.

La única manera de resolver el problema era eliminando los potenciales de acción. En un principio, los investigadores lo intentaron criando gatos en completa oscuridad desde su nacimiento. La suturación de ambos ojos hubiera sido insuficiente, ya que puede penetrar algo de luz a través de los párpados cerrados. (La ausencia de estímulo visual no parece molestar a las crías de gato: se mantienen vigorosos y juguetones y su crecimiento sigue un ritmo normal.)

El sistema visual de los animales criados en la oscuridad se desarrolló anormalmente, aunque sí algo. A diferencia de las columnas de dominio ocular de los animales normales, las de los gatos criados en tales condiciones estaban poco definidas y el espacio entre las zonas adyacentes de las columnas era frecuentemente desigual. En otras palabras, había empezado la segregación posnatal oculoespecífica de los axones geniculocorticales, pero quedaba incompleta.

En un principio, el descubrimiento de que tenía lugar algún desarrollo parecía implicar que la maduración podía llevarse a cabo, al menos en parte, incluso sin actividad de la vía óptica. Pero otros trabajos demostraban que los potenciales de acción no se habían eliminado totalmente; ello implicaba que no había que descartar otras explicaciones alternativas. Así, William Burke y William R. Hayhow, de la Universidad de Sydney, demostraron que la ausencia total de estímulo visual no im-



4. DESARROLLO DE LAS VIAS OPTICAS del gato; acostumbra seguir un orden determinado. Los axones procedentes de las células ganglionares de la retina llegan al núcleo geniculado lateral hacia la mitad de la gestación. En un comienzo, los axones, demasiado inmaduros, no están capacitados para establecer sinapsis con las células geniculadas, que se disponen desordenadamente en el núcleo. Cuando el gato nace, las células geniculadas ya se encuentran parceladas en capas, y los axones retinogeniculados se han segregado, de suerte que cada capa del núcleo geniculado lateral recibe información sólo del ojo derecho (*color naranja claro*) o sólo del ojo izquierdo (*color verde claro*). Los axones retinogeniculados han empezado a establecer sinapsis con las células relé, pero aún no se han formado las sinapsis con las interneuronas. En este momento también, los axones de muchas células relé han establecido sinapsis con células de la corteza visual. Sin embargo, estos axones se solapan: los que transportan información del ojo derecho (*color naranja oscuro*) terminan con frecuencia en las mismas células corticales que los axones del ojo izquierdo (*color verde oscuro*). Hacia el final de la octava semana de vida, los axones retinogeniculados han completado sus sinapsis con las células relé y con las interneuronas; por su parte, los axones geniculocorticales se han segregado y se pueden identificar columnas de dominio ocular específicas para cada ojo del animal.

pedía completamente la actividad de las células ganglionares; estas células descargan potenciales de acción de forma espontánea, incluso en ausencia de luz. Además, Robert W. Rodieck y P. S. Smith, entonces en la Universidad de Sydney, y David N. Mastronarde, de la de Colorado en Boulder, demostraron, por separado, que, con frecuencia, las células ganglionares de un ojo descargaban potenciales espontánea y casi simultáneamente, aunque la actividad de las células ganglionares en un ojo no guardaba relación con la actividad del otro ojo.

Tomados en conjunto, estos resultados sugerían que la emisión espontánea y simultánea de impulsos por parte de las células ganglionares dentro de cada ojo podría ser la causante del desarrollo observado. En particular, parecía razonable suponer que los diferentes patrones de actividad espontánea de las células ganglionares en el ojo derecho y en el izquierdo podrían haber actuado favoreciendo la ordenación en columnas de dominio ocular rudimentarias, de los axones geniculocorticales en desarrollo.





5. SEGMENTO DE LA CORTEZA VISUAL, en un gato de ocho semanas; difiere notablemente de un segmento comparable de un gato de la misma edad cuya actividad en uno de sus ojos se ha eliminado experimentalmente durante su desarrollo. En el gato normal (*arriba*), las zonas alternas blancas y rosas ponen de manifiesto la presencia de columnas de dominio ocular. (Las zonas blancas se obtuvieron por inyección en un ojo de trazadores radiactivos que se dirigieron hacia la corteza.) En cambio, la muestra de la corteza de los gatos tratados no presenta esas zonas (*abajo*); la banda brillante indica que la región es sensible a información procedente del ojo que recibía estimulación visual (*banda blanca continua*). Es, pues, necesaria la llegada de impulsos a través de las vías ópticas de ambos ojos para que se desarrollen las columnas de dominio ocular. (Fotografías tomadas por el autor.)

El fracaso de la cría de animales en oscuridad absoluta para bloquear los potenciales de acción hizo necesario buscar una aproximación diferente para determinar si los potenciales de acción eran o no necesarios para el desarrollo de las sinapsis. Afortunadamente, la naturaleza nos proporciona una toxina, la tetrodotoxina, que resulta idónea para dicho empeño. Esta sustancia, que se encuentra en los ovarios de un pez japonés y también en un tritón común en California, impide la aparición de potenciales de acción sin dañar el tejido nervioso. Actúa uniéndose a los canales del ion sodio dependientes del voltaje y bloqueando así la entrada de este ion fundamental en las células. Desgraciadamente, la circulación en sangre de escasas millonésimas de gramo de tetrodotoxina por kilogramo de peso es letal para la mayoría de los mamíferos y hasta hace muy poco no era posible utilizar esta sustancia en experimentos. (La toxina paraliza rápidamente funciones nerviosas vitales; entre ellas, la de la respiración.)

Hace cosa de unos diez años, se desarrollaron métodos para inyectar la toxina en el ojo de suerte que permaneciera confinada allí y no pasara a la circulación general. Una inyección indolora cada dos o tres días es suficiente para evitar que las células ganglionares de la retina generen potenciales de acción.

Con este nuevo método, Stryker, que se había trasladado a la Universidad de California en San Francisco, y William A. Harris, de la sede de la misma en San Diego, pudieron eliminar la ambigüedad de los resultados con animales criados en oscuridad absoluta. Tratando con tetrodotoxina ambos ojos de gatos recién nacidos hasta que llegaban a la edad de seis semanas, impidieron la formación de las columnas de dominio ocular en la corteza visual. Por tanto, demostraron la necesidad de los potenciales de acción para que surgieran dichas columnas.

Mediante la tinción de los axones geniculocorticales asociados a cada ojo, Stryker y Harris demostraron, además, que la detención del desarrollo cortical derivaba, como era de esperar, de la incapacidad de los axones que se prolongaban hasta la cuarta capa de la corteza visual para segregarse en zonas específicas de cada ojo; en lugar de ello, los axones correspondientes al ojo derecho o al izquierdo solían establecer contactos sinápticos con las mismas células. En consecuencia de lo cual, cuando se detenía la administración de la toxina, la mayoría de las células corticales respondían de forma casi idéntica a las señales procedentes de ambos ojos. Estas propiedades, características de la corteza visual neonatal de los gatos, resultan insólitas en animales de seis semanas.

Por las mismas fechas en que Stryker y Harris realizaban sus investigaciones, Mark W. Dubin, Louisa A. Stark y Steven M. Archer, de la Universidad de Colorado en Boulder, abordaban los efectos neurofisiológicos del bloqueo de las células ganglionares en los núcleos geniculados laterales. Inyectaban tetrodotoxina en el interior de un ojo de un grupo de gatos durante los dos primeros meses de vida y registraban la actividad eléctrica de las células geniculadas a los pocos días de interrumpir el tratamiento.

Sus registros demostraban que la eliminación de los potenciales de acción en las células ganglionares durante dicho período impedía la aparición de un cambio fundamental en las neuronas geniculadas laterales. Normalmente, al final del segundo mes de vida de un gato, las neuronas geniculadas no sólo se han parcelado en capas específicas para cada ojo, sino que se han especializado también en otro sentido: algunas células generan potenciales de acción sólo cuando un destello de luz estimula el centro de su campo receptor, mientras que otras se activan sólo cuando desaparece el destello. (El campo receptor es la parte del campo visual sobre el cual una célula recibe información.) Esta especialización resulta de la segregación de los axones retinogeniculados, en el sentido de que los axones de las células ganglionares

que responden al destello luminoso terminan en células geniculadas distintas de aquellas en las que acaban los axones de las células ganglionares que se estimulan cuando la luz desaparece.

Ahora bien, en los animales tratados, la mayoría de las células geniculadas asociadas con el ojo inyectado podían estimularse con la emisión del destello luminoso igual que con la interrupción del mismo. Las células eran incapaces de distinguir ambas situaciones.

En resumen, esta serie de estudios con tetrodotoxina permitió demostrar de manera casi concluyente que, cuando se bloqueaban los potenciales de acción en el sistema visual, no se producía un desarrollo adecuado de las sinapsis; los axones geniculocorticales no se segregaban en dominios oculoespecíficos, ni la segregación de "encendido y apagado" de los axones retinogeniculados ocurría de forma correcta en el núcleo geniculado lateral.

A pesar de ello, las investigaciones no facultaban para emitir ningún juicio definitivo sobre lo que estaba sucediendo en la estructura de las sinapsis. Por ejemplo, no estaba claro si el bloqueo de los potenciales de acción en las células ganglionares entorpecía el desarrollo anatómico de los sacos terminales de los axones.

Sólo el microscopio electrónico podía ofrecer información directa acerca de ese particular. Por ello, recurrimos a esta técnica Dubin, Stark, Grayson L. Scott, colaborador mío en Wisconsin, y yo mismo. El trabajo venía facilitado con los trabajos anteriores que había realizado con Scott, que nos habían permitido identificar muchos aspectos del desarrollo sináptico retinogeniculado normal.

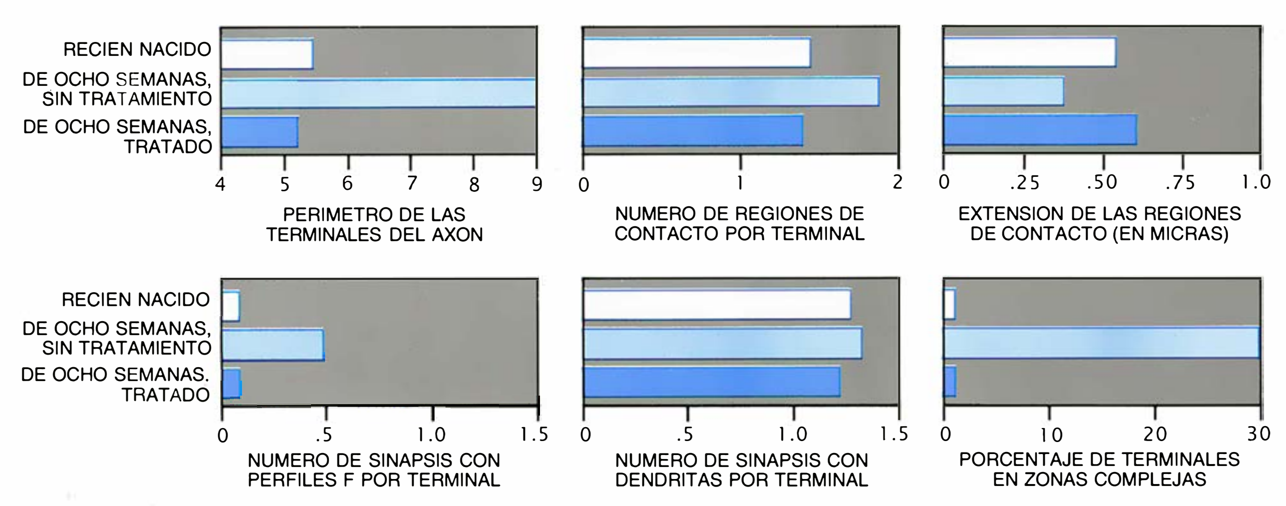
En esos trabajos se había demostrado que los sacos terminales de las células ganglionares de la retina se modificaban por vías específicas durante los primeros dos meses de vida de un gato. Por dar un ejemplo: su sección transversal se dobla, de forma característica, y la longitud de las regiones especializadas para el contacto sináptico se acorta aproximadamente un tercio. (Este acortamiento puede ayudar a encarrilar el flujo de las moléculas neurotransmisoras liberadas.)

Habíamos averiguado, también, que, hacia principios de la tercera semana después del nacimiento, los sacos empezaban a aumentar el número de contactos que establecían con las dendritas en el núcleo geniculado lateral. Los sacos mantenían todos los contactos ya existentes con las dendritas de las células relé geniculadas y establecían nuevas sinapsis con apéndices especializados (denominados perfiles F) de las dendritas de las interneuronas, una clase de células. Las interneuronas, que emiten mensajes inhibidores en el núcleo geniculado lateral, son fundamentales en el ajuste fino de la actividad de las células relé.

Hacia el final del segundo mes, suele producirse otro cambio importante. En ese momento, aproximadamente el 30 por ciento de todos los sacos terminales retinogeniculados se disponen en lo que se llama zonas de sinapsis complejas, que constan de un saco rodeado por una agrupación de dendritas y de perfiles F. Cada zona sináptica compleja está envuelta por extensiones protoplasmáticas de las células gliales, que contribuyen a la formación del armazón estructural del cerebro. Aunque no se conoce con exactitud la función de estas zonas complejas, podrían ayudar a aislar de influencias externas las conexiones sinápticas.

Cuando inyectamos tetrodotoxina en un ojo en un grupo de gatos durante las primeras ocho semanas de vida, descubrimos que las conexiones sinápticas que formaban las células ganglionares en el ojo tratado permanecían idénticas a las existentes en el momento del nacimiento de los animales. Se detuvo completamente el desarrollo. En ausencia de potenciales de acción, los sacos no aumentaban su tamaño, ni presentaban un acortamiento de sus regiones de contacto, ni establecían tampoco contactos sinápticos con los perfiles F. Todas las sinapsis se establecían fundamentalmente con las dendritas de las células relé y apenas si había zonas de sinapsis complejas.

Aunque nuestros estudios demostraban que la eliminación de los potenciales de acción suspendía la



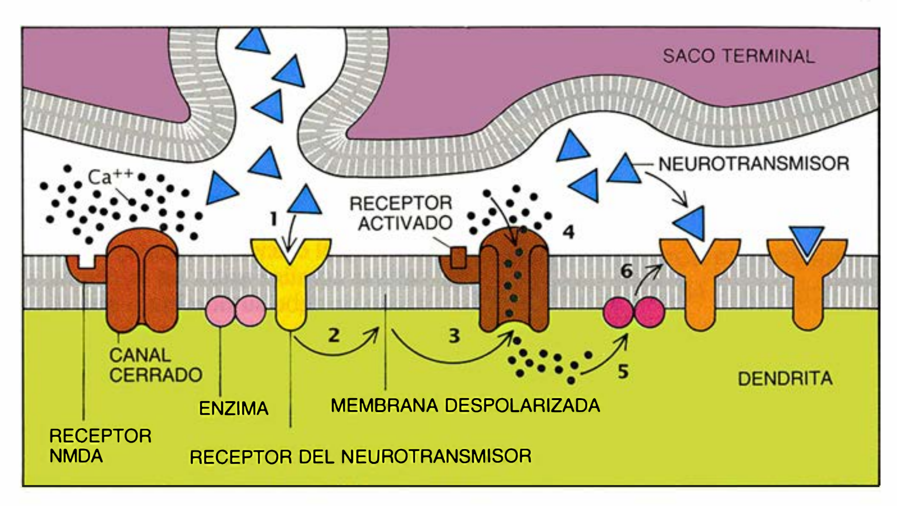
6. GRAFICOS que sintetizan los principales datos que demuestran la necesidad de que las células ganglionares de la retina generen potenciales de acción para que maduren los sacos terminales de sus axones. Se tomaron microfotografías electrónicas de secciones del núcleo geniculado lateral de gatos recién nacidos, de gatos normales de ocho semanas y de gatos "tratados", también de ocho semanas, en los que se había bloqueado, desde su nacimiento, los potenciales de acción de las células ganglionares de un ojo. Las imágenes recogidas ponían de manifiesto que los sacos terminales de los axones de las células bloqueadas en los gatos tratados de ocho semanas eran casi idénticos a los de los gatos recién nacidos. Comparándolos con los sacos de los gatos de ocho semanas normales (sin tratar), los de los gatos recién nacidos y los de los tratados eran menores, establecían menos conexiones sinápticas y presentaban regiones de contacto mayores (regiones especializadas en la liberación de neurotransmisores); apenas existían sinapsis con los perfiles F. Casi ninguno de los sacos terminales de los animales recién nacidos y de los tratados se encontraban en zonas sinápticas complejas, mientras que el 30 por ciento de los sacos terminales de los gatos normales de ocho semanas estaban en esas zonas complejas.

maduración de los sacos axónicos en las células ganglionares, los resultados obtenidos no excluían la posibilidad de que el bloqueo retinal se limitara a retrasar el desarrollo, que podría reanudarse en cuanto se restableciera la actividad neuronal. Los resultados tampoco indicaban si el desarrollo podía darse de la manera habitual en el caso de que se dejara crecer normalmente a un gato recién nacido durante cierto tiempo antes de bloquear los potenciales de acción. Nos propusimos resolver una y otra cuestión con dos series más de experimentos.

En la primera serie, bloqueábamos los potenciales de acción de las células ganglionares de la retina de un ojo durante las primeras cuatro a diez semanas después del nacimiento; a continuación, interrumpíamos la administración de la toxina para permitir algunos meses de actividad normal. Si observábamos que las conexiones retinogeniculadas se desarrollaban normalmente incluso en el caso de actividad retardada, podríamos concluir que los potenciales de acción, aunque necesarios para el desarrollo, no se requerían durante un período específico.

En la segunda serie de experimentos, dejábamos que los animales tuvieran experiencias visuales normales hasta la tercera o quinta semana de vida, antes de iniciar las inyecciones de tetrodotoxina. Si las conexiones retinogeniculadas se desarrollaban sin contratiempos, podríamos concluir que los potenciales de acción eran necesarios para iniciar el desarrollo de las sinapsis, aunque no para mantenerlo.

Las conexiones retinogeniculadas no se desarrollaron bien en ninguna de estas condiciones. Lo más cercano al desarrollo normal ocurría en la primera serie de experimentos, cuando el bloqueo retinal se interrumpía en una fase precoz (después de las primeras cuatro semanas de tratamiento). En este caso, el tamaño de las terminales del axón y el número de sinapsis que establecían se aproximaban a los normales (75 por ciento), pero el número de zonas sinápticas complejas aparecía notablemente rebajado.



7. MECANISMO mediante el cual los receptores NMDA podrían provocar potenciaciones a largo plazo —cambios persistentes de la intensidad de las conexiones sinápticas— en el hipocampo del cerebro. (Mecanismo que sólo conocemos en parte.) Cuando se transmite información a través de la célula presináptica según una cronología y un patrón adecuado (*1*), los estímulos despolarizan la membrana celular (*2*), de forma que se activan los receptores NMDA, produciendo la apertura de los canales permeables a los iones calcio controlados por dichos receptores (*3*). Conforme los iones entran en la célula (*4*), van activando determinadas enzimas (*5*), incluidas posiblemente las que colaboran en la reorganización de las proteínas de la membrana, de manera que aumenta la eficacia de la sinapsis (*6*). La activación sistemática de una neurona por parte de otra durante el desarrollo del cerebro podría reforzar las sinapsis mediante un mecanismo similar al aquí descrito.

La segunda serie de experimentos demostró que la experiencia visual temprana previa al bloqueo retinal no podía iniciar el desarrollo sináptico habitual. Aun cuando se permitía que hubiera potenciales de acción durante todo el primer mes de vida, las conexiones retinogeniculadas que se observaban posteriormente eran casi las mismas que las existentes en el momento del nacimiento. Todos nuestros resultados abonaban, pues, la necesidad de potenciales de acción durante los dos primeros meses de vida (y, sobre todo, durante el segundo mes) para la maduración de los sacos terminales de las células ganglionares y el establecimiento de conexiones sinápticas nuevas. Si se bloquean los potenciales de acción en cualquier momento de ese período, se impedirá el desarrollo normal.

El mecanismo íntimo de este proceso todavía no se conoce. ¿Cuál es la secuencia de acontecimientos moleculares mediante la cual el paso de impulsos de neurona a neurona, durante el desarrollo del cerebro, estimula la maduración de los sacos terminales de los axones o modifica la distribución y la intensidad de las conexiones sinápticas? La pregunta carece aún de respuesta.

Sin embargo, los trabajos teóricos y experimentales centrados en los procesos de aprendizaje pueden aportar alguna información a propósito de la intensidad de las sinapsis. Los resultados de tales estudios son potencialmente aplicables al proceso de desarrollo, porque el aprendizaje, como el desarrollo, requiere la agrupación y el reforzamiento de determinadas conexiones sinápticas, amén del debilitamiento y la eliminación de otras. En 1949, Donald O. Hebb, de la Universidad de McGill, propuso una primera hipótesis para explicar los mecanismos mediante los cuales la actividad nerviosa modificaba las conexiones sinápticas. Sugirió que, cuando una célula conseguía "repetida o persistentemente" activar a otra, ocurrían cambios metabólicos o estructurales, en una de las células o en ambas, que aumentaban la eficacia de las conexiones intercelulares. (Para reforzar las sinapsis, una actividad ocasional o casual no sería suficiente.)

En su momento, la hipótesis de Hebb no pudo comprobarse. Sin embargo, más recientemente, los estudios de las bases moleculares del fenómeno llamado potenciación a largo plazo han sugerido un mecanismo mediante el cual la actividad mantenida a través de las sinapsis podría reforzar a las mismas. La potenciación a largo plazo, descrita ya en 1966 por Terje Lømo, de la Universidad de Oslo, es el aumento de la eficacia sináptica durante días, o incluso indefinidamente, en respuesta a ráfagas controladas de estímulos. En los mamíferos, se puede dar fácilmente la potenciación a largo plazo en el hipocampo, región del cerebro decisiva en los procesos de aprendizaje y memoria.

La exposición de una neurona del hipocampo a un patrón particular de estímulos excitadores —corrientes eléctricas breves, de alta frecuencia— puede, en segundos, producir un aumento mantenido de larga duración en la eficacia sináptica. Se tardó muchos años en comprender cómo ese

patrón crítico conseguía la potenciación a largo plazo, pero se obtuvo una clave fundamental cuando se descubrió que dicho patrón activaba específicamente el receptor NMDA (*N*-metil-D-aspartato). Esta molécula realiza funciones de puerta, regulando la actividad de un canal a través del cual el calcio (un mensajero intracelular común) entra en la célula. El receptor debe su nombre a que el canal asociado, sensible normalmente a los cambios de voltaje, puede abrirse en condiciones experimentales cuando se expone al NMDA; se supone que el efecto está mediado por la unión del NMDA a la molécula celadora.

La estimulación breve y de alta frecuencia de una célula postsináptica en el hipocampo crea una entrada de iones cargados positivamente y disminuye el potencial de membrana por debajo de un umbral. Este cambio activa los receptores NMDA, provocando la apertura de los canales de calcio asociados. Los iones de calcio penetran entonces en la célula a través de los canales abiertos y activan enzimas intracelulares, entre las cuales se encuentran, probablemente, las que se relacionan con la zona de la membrana postsináptica especializada en recibir las transmisiones. Aunque desconocemos los sucesos pormenorizados que tienen lugar a continuación, esas enzimas podrían producir una reorganización de las proteínas de la membrana y aumentar, en consecuencia, la eficacia con que la célula postsináptica responde a patrones específicos de estimulación [véase "Almacenamiento de memoria y sistemas neurales", por Daniel L. Alkon; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1989].

Resulta tentador imaginar la intervención de un mecanismo similar en el refuerzo de las sinapsis durante el desarrollo del cerebro. En ese contexto, un receptor sensible a los cambios de voltaje, como el receptor NMDA, podría detectar la activación repetida de las células corticales por parte de los axones geniculocorticales asociados a un ojo. La detección del cambio podría instar la reorganización, mediada por calcio, de la membrana postsináptica, lo que conduciría al refuerzo y a la estabilización definitiva de las sinapsis activas.

Este mecanismo ofrece particular atractivo. Propone un modelo bastante sencillo para explicar el control del comienzo y término de los períodos críticos para el desarrollo dependiente de la actividad nerviosa en los diferentes sistemas cerebrales. Permitiría controlar, de manera eficaz, la duración de dichos períodos en grupos específicos de neuronas si su maquinaria bioquímica estuviera genéticamente programada para acometer, en su momento justo, el inicio y el fin de la síntesis de moléculas que, como el receptor NMDA, fueran sensibles a ciertos patrones de estimulación. Dado que la inclusión en los genes de las órdenes de inicio y término no requiere mucha codificación, un modelo como el propuesto parece bastante plausible.

Una ventaja adicional de este modelo es que puede también explicar la prolongada plasticidad de otras partes del cerebro. Sólo se precisaría que las neuronas estuvieran genéticamente programadas para producir receptores NMDA (o moléculas de función similar), de forma ininterrumpida, en vez de suspender dicha síntesis en un momento dado. Por consiguiente, la variación en un solo aspecto bioquímico explicaría los períodos relativamente cortos de plasticidad dependientes de la actividad, así son los que se dan en el desarrollo de la corteza visual, amén de la plasticidad, aparentemente indefinida, que se observa en otras partes del cerebro; en el hipocampo, por ejemplo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE FIRST STAGE OF PERCEPTION: GROWTH OF THE ASSEMBLY. *The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory*. Donald O. Hebb. John Wiley & Sons, Inc., 1949.

BINOCULAR IMPULSE BLOCKADE PREVENTS THE FORMATION OF OCULAR DOMINANCE COLUMNS IN CAT VISUAL CORTEX. Michael P. Stryker y William A. Harris en *Journal of Neuroscience*, vol. 6, n.º 8, págs. 2117-2133; agosto de 1986.

ELIMINATION OF ACTION POTENTIALS BLOCKS THE STRUCTURAL DEVELOPMENT OF RETINOGENICULATE SYNAPSES. Ronald E. Kalil, Mark W. Dubin, Grayson Scott y Louisa A. Stark en *Nature*, vol. 323, n.º 6084, págs. 156-158; 11 de septiembre de 1986.

THE ROLE OF ACTION POTENTIALS IN THE MORPHOLOGICAL DEVELOPMENT OF RETINOGENICULATE CONNECTIONS IN THE CAT. Ronald E. Kalil y Mark W. Dubin en *Cellular Thalamic Mechanisms*. Dirigido por Marina Bentivoglio y Roberto Spreafico. Elsevier Science Publishers, 1988.

THE ROLE OF FUNCTION IN THE PRENATAL DEVELOPMENT OF RETINOGENICULATE CONNECTIONS. Carla J. Shatz en *Cellular Thalamic Mechanisms*. Dirigido por Marina Bentivoglio y Roberto Spreafico. Elsevier Science Publishers, 1988.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Ciencia y sociedad

Los mosaicos de la Gran Aljama de Córdoba

Quienquiera que visite por primera vez la Mezquita-Catedral cordobesa con la intención de conocer *in situ* lo que subsiste en ésta de la magna construcción religiosa de los soberanos Banū Umayya andalusíes, quedará gratamente sorprendido al comprobar que, lo conservado de ella, basta y sobra para adquirir la certeza de que no hubo ni un ápice de gratuidad cuando la grey musulmana llegó a considerarla como la Gran Aljama, por excelencia, del occidente islámico.

Salta también a la vista que, de las cinco ampliaciones que experimentó, al correr del tiempo, la primitiva mezquita fundada por ʻAbd al-Raḥmān I en el año 786, fue la realizada, a partir del 961 y bajo la égida del califa al-Ḥakam II, la que dio a la sala de rezos verdadera monumentalidad, y que lo más sobresaliente de este aditamento al-ḥakamí se tiene en las exquisitas labores de musivaria en él conservadas, aunque el paso de los siglos las haya mutilado infaustamente.

Según las crónicas árabes mejor documentadas, fue el emperador de Bizancio Nicéforo II Focas (963-969) quien, a instancias del sabio soberano al-Ḥakam, envió a la corte cordobesa un maestro mosaísta y ciento veinte quintales de teselas para la realización de ese exorno arquitectónico. Tan meritísimo trabajo lo inició dicho maestro con el concurso de un grupo de servidores palatinos puestos a su disposición por el Califa para que aprendiesen y practicaran semejante actividad artística. Y fueron ellos quienes, una vez formados en la misma, dieron feliz remate a la obra, mientras el especialista bizantino se volvía a su país remunerado espléndidamente y cargado de valiosas dádivas, gracias a la proverbial magnificencia del monarca cordobés.

Como se han encargado de difundir hasta la saciedad los tratados dedicados al arte hispano-árabe, las zonas de la precitada ampliación de al-Ḥakam II que ostentan mosaico son: la *qubba* o cúpula del vestíbulo del *miḥrāb*, el nicho indicativo de la *qibla* o línea de orientación de las oraciones; todo el fastuoso testero del muro de *qibla* correspondiente a la fachada del *miḥrāb*; el testero colateral derecho del anterior, en que se abre la *Bāb al-Sābāṭ* o "Puerta del Pasadizo", por donde se establecía la comunicación entre la Aljama y el frontero, calle de por medio, Alcázar Califal, y, finalmente, el testero colateral izquierdo de dicha fachada, en el que se ubica la *Bāb Bayt al-Māl* o "Puerta de la Cámara del Tesoro".

Por lo que respecta a la primera zona y haciendo total abstracción de la maravillosa estructura arquitectónica que presenta esta cúpula al no ser ello fundamental en el presente caso, sólo ha de tomarse nota de que no hay ningún elemento importante en ella –nervaduras, pechinas, cupulín de gallones..., etc.– que no se halle revestido de mosaico, aunque también es digno de anotarse la solución que dieron los alarifes andalusíes al problema técnico que les planteó el aristado de los gallones del cupulín en su intersección con la cornisa de nacela que le sirve de arranque: intercalar entre el uno y la otra unas simples piezas de cerámica convenientemente diseñadas y prefabricadas, sin duda, en el alfar real de Madīnat al-Zahrā'. Según las crónicas árabes, la construcción de esta cúpula se terminó en la luna de la segunda ŷumādā del año 354 H. (4 junio/2 julio de 965 J. C.), por lo que es obligado admitir,

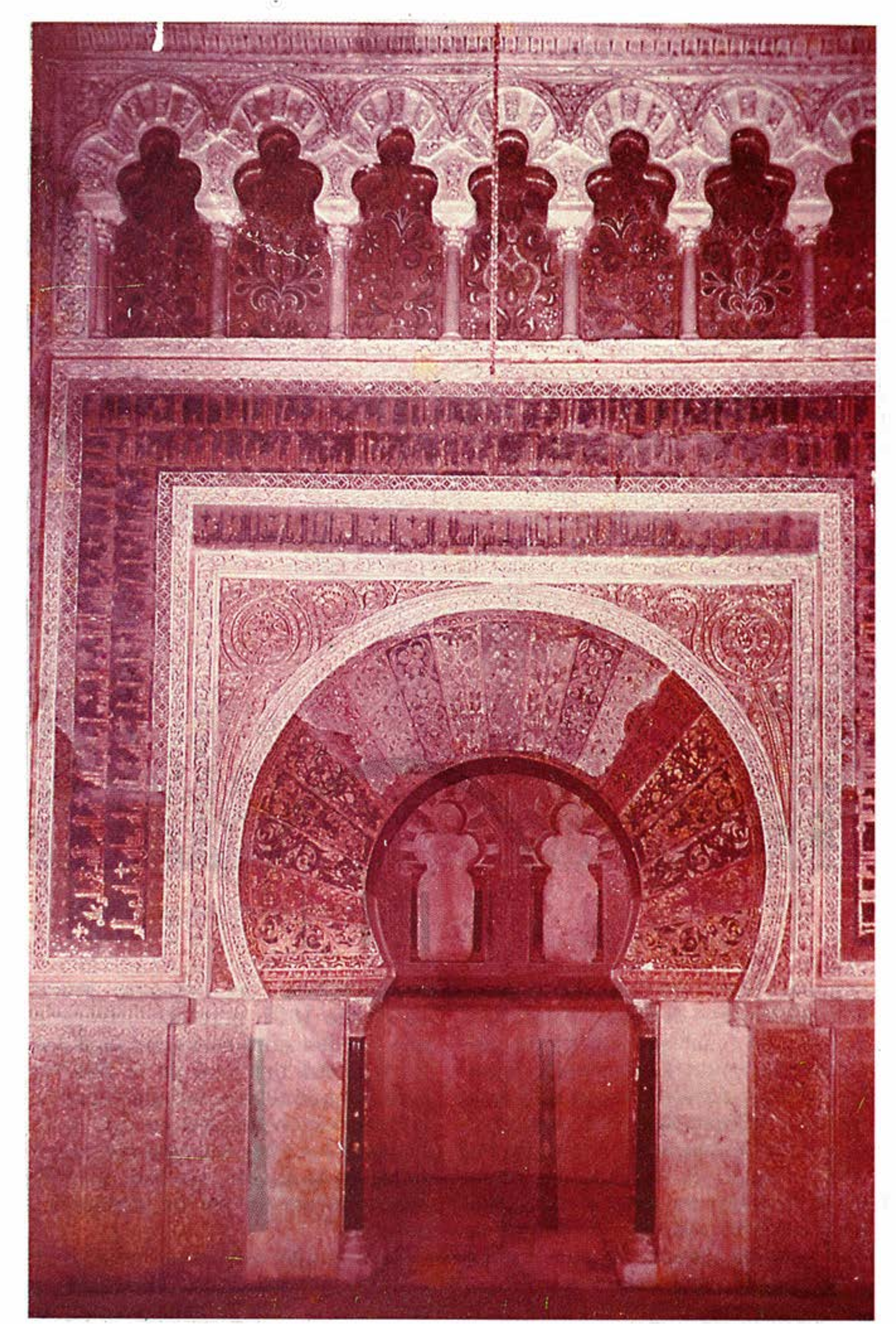
1. Cúpula de la antesala del miḥrāb.

lógicamente, que su revestido de mosaico no pudo iniciarse antes de esa fecha. Y en cuanto a la faja epigráfica que corre inmediatamente por debajo de la aludida cornisa de nacela, su texto lo constituyen los versículos 76, 77 y 78 de la Sūra XXII del Qur'ān, sin la más mínima referencia a data alguna.

La zona segunda es la que supera a las otras tres en cuanto a riqueza ornamental y perfección artística, pues el elemento arquitectónico que constituye la razón de su existencia, el arco de acceso al nicho del *miḥrāb*, se dotó de un mayestático arrabá donde se aunaron magistralmente dos sistemas decorativos tan dispares como lo fueron el mosaico bizantino y el ataurique arábigo-cordobés o califal. Por añadidura, se incluyeron en la ornamentación tres fajas epigráficas, de las cuales, salvo una que campea sobre las albanegas del arco y sólo contiene el versículo coránico 23 de la Sūra LIX, las otras dos componen un texto fundacional de singular importancia, pues conmemoran el levantamiento (*tašyīd*) de la construcción, mandada realizar por al-Ḥakam II a su liberto y *ḥāŷib* o chambelán. Ŷa'far ibn 'Abd al-Raḥmān, bajo la inspección de los jefes de su *šurṭa* o policía Muḥammad ibn Tamlīj, Aḥmad ibn Naṣr y Jald ibn Hāšim, y del *kātib* o secretario Muṭarrif ibn 'Abd al-Raḥmān. A partir de las siete dovelas centrales, aproximadamente del susodicho arco, la decoración en mosaico ha sufrido un grave deterioro con los años, lo que ha motivado la pérdida del principio y el final de esta inscripción; pero ello no impide garantizar sin temor a error que en ella no se mencionó data alguna.

Se supone que el tal deterioro se produjo al fundar, en el año 1368, don Alonso Fernández de Montemayor la capilla de San Pedro, ocupando todo el vestíbulo del *miḥrāb*, tras haberlo recibido en donación del Obispado y Cabildo de la catedral cordobesa. Mas semejante suposición es pura falacia, toda vez que la capilla se montó con su retablo retirado del testero en cuestión para que no interrumpiera el tránsito a la sacristía de la misma, la cual se estableció en el propio nicho del *miḥrāb*.

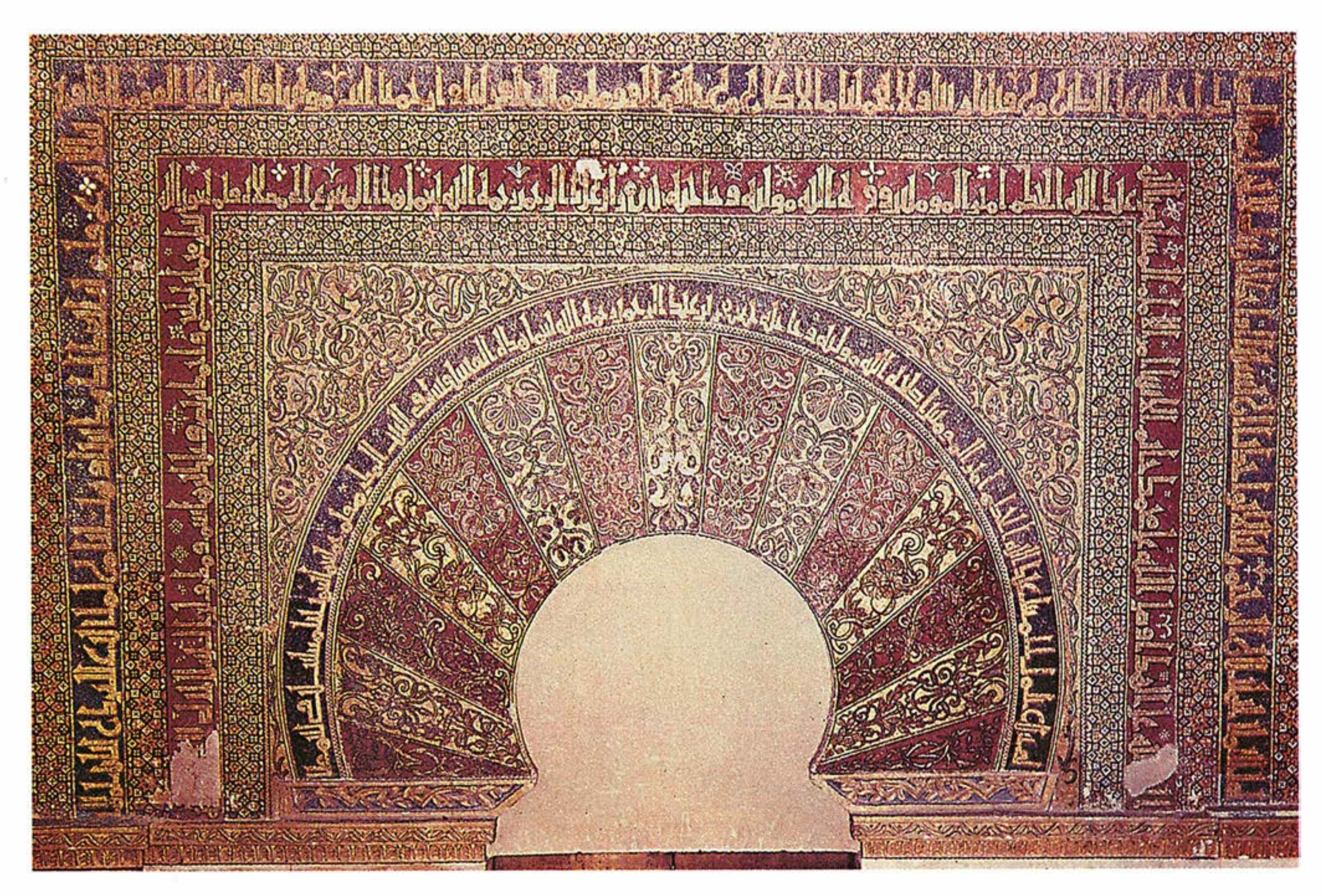
En alguna que otra crónica árabe se hace alusión a dos períodos críticos en los que, según todas las probabilidades, se pudo atentar contra la integridad física de los mosaicos. El primero de estos períodos fue cuando sobrevino la *fitna* o guerra civil, que se inició, en el año 1009, como una rebelión contra 'Abd al-Raḥmān Sanchuelo, el último vástago de la zaga de Almanzor, y terminó, veintidós



2. Fachada del miḥrāb.

años más tarde, con la caída total del califato de los Banū Umayya cordobeses, una época ésta en la que el pueblo llano de la hasta entonces capital de al-Andalus cometió no pocas tropelías en el interior de la Gran Aljama, la cual le había estado antes virtualmente vedada como si la misma no hubiera tenido otro destinatario que la *jāṣṣa* o aristocracia.

El segundo período crítico se dio en el año 1146, cuando Alfonso VII de León consiguió apoderarse de Córdoba por unos meses, durante los cuales es seguro que se desmontaron las manzanas o esferas que remataban la cúpula del monumental alminar de la Mezquita, y que produjéronse mutilaciones sensibles tanto en su fastuoso *minbar* como en la decoración mosaísta. Si a ello se añade la circunstancia de que el deterioro de los mosaicos afecta sólo a los que exornan la parte baja del arrabá, o sea, aquéllos más fácilmente alcanzables, no hay duda de que dichas noticias han de ser consideradas como veraces, máxime si se tiene en cuenta que de haber sido la fijación de un retablo la causa del destrozo, éste habría afectado, principalmente, a la parte alta del arrabá y no a la baja. En el año 1815, se desmanteló la capilla por completo y procedióse a re-



3. *Puerta del Pasadizo* (detalle).

llenar las partes perdidas del mosaico con cuadraditos de vidrio coloreados a mano, los cuales se colocaron pretendiendo imitar las labores originales; pero no pasaron de ser un burdo remedo, debiéndose este ingenioso sistema de restauración a Patricio Furriel, organero de la catedral.

La zona tercera o del testero colateral derecho del *miḥrāb* consta de tres sectores distintos ornamentados con mosaico. El primero y principal lo constituye el arrabá del arco de la *Bāb al-Sābāṭ*, el cual está compuesto por las siguientes fajas epigráficas: una superior que contiene los versículos 286 y 6 de las Sūras II y III del Qur'ān, respectivamente; otra inferior en la que se conmemora la ejecución de este acceso al lugar de oración del Califa, lo que se hizo con la intervención de los mismos personajes citados en el mosaico de la portada del *miḥrāb*, y, por último, una tercera, configurada a modo de arquivolta, con texto igualmente conmemorativo, pues perpetúa la terminación, en su totalidad, de los trabajos de *fusayfasà* o mosaico, los cuales al-Ḥakam ordenó realizar a Ŷa'far, su ya mencionado chambelán. A todas estas fajas epigráficas les falta el principio y la terminación, por lo que también fueron objeto de las pésimas restauraciones del organero Furriel en el año 1815; pero son estropicios que pueden subsanarse con facilidad, a excepción del final de la faja tercera, en que figuró, indudablemente, la designación del año en que se remataron los tales trabajos conmemorados en la misma, sin que quede el menor rastro de tan importantísima datación.

El segundo sector se tiene en la ventana abierta sobre el arrabá en cuestión, la cual se halla recuadrada por una faja epigráfica, constituida por los versículos coránicos 101 y 102 de la Sūra VI.

Y, finalmente, el sector tercero lo integra una faja epigráfica situada inmediatamente por debajo del gran arco que encabeza, a todo lo ancho, el conjunto del testero, la cual también contiene sólo citas coránicas: en este caso, los versículos 30, 31 y 32 de la Sūra XLI.

La cuarta y última zona la constituye el testero colateral izquierdo de la fachada del *miḥrāb*, donde se abre la *Bāb Bayt al-Māl*, como ha quedado dicho. Este testero fue cubierto, hacia el último tercio del siglo XVI, por el monumental retablo de la Cena, una de las obras más celebradas del polifacético artista cordobés Pablo de Céspedes, y, desde entonces, esta parte de la Mezquita-Catedral se viene denominando comúnmente "Capilla de la Cena". Ignórase en qué estado de conservación se encontraban los mosaicos de este testero por aquella época; se sabe, en cambio, que, cuando se desmontó la capilla, allá por el año 1915, no apareció resto alguno de ellos, por lo que toda la decoración mosaísta que ostenta hoy aquél es moderna y producto de una restauración proyectada por el arquitecto don Ricardo Velázquez Bosco, con la ayuda del epigrafista don Rodrigo Amador de los Ríos, y realizada por una prestigiosa firma madrileña en 1916. Se trata de una reproducción tan exacta del exorno original aún conservado en el testero colateral derecho que hasta el texto conmemorativo de éste se copió fielmente en el nuevo arrabá, convirtiéndose así lo que había sido antaño puerta de entrada a la Cámara del Tesoro en otro acceso al lugar de oración del Califa.

Pero tamaño dislate de los restauradores no es tan grave como el que cometieron al suplir, alegremente, el año 354 H. en la reproducción de la faja epigráfica arqueada donde debió figurar la verdadera fecha de terminación de todas las labores de musivaria realizadas en la Mezquita. Lo peor del caso fue que el trabajo re-

sultó tan perfecto que llegó a confundir, quince años más tarde, a un especialista de la talla científica de E. Lévi-Provençal, quien creyó encontrarse ante la decoración prístina de este testero, la cual habría aparecido en toda su integridad al desmontarse el retablo de la aludida capilla de la Santa Cena, por lo que adjudicó esa falsa data a los demás mosaicos, sin otros considerandos. Y si a esta irreflexión del desaparecido profesor francés se añade el error que cometió al transcribir el archiconocido término técnico *tašyīd* (erección, levantamiento..., etc.) por un *tašbīk* supuestamente alusivo al original entrecruzamiento de arcadas que se da en la Mezquita, la verdad es que prestó un flaco servicio a los historiadores del Arte, en general, y a los especialistas del arábigo-cordobés, en particular, con sus tan irreflexivas conclusiones.

Ahora bien, los restauradores suplieron presumiblemente el año en cuestión porque el mismo figura en una inscripción que corona el zócalo marmóreo del nicho del *miḥrāb* y conmemora tan espléndido revestimiento, citando, a continuación, a todos los personajes, desde el Califa al *kātib*, que se mencionan en dos de los textos fundacionales incluidos en los mosaicos, lo cual induce a suponer que todos estos trabajos se remataron, efectivamente, en esa anualidad. Sin embargo, existe una diferencia muy significativa en la redacción de la una y de los otros al aludir a Ŷa'far, el *ḥāŷib* que tanto significó en la vida de al-Ḥakam II: mientras en la inscripción del zócalo el nombre del fiel esclavo va acompañado de la expresión *¡Allāh esté satisfecho de él!*, en las de los mosaicos figura *¡Allāh se apiade de él!* Por consiguiente, entre la labra de la una y la realización de las otras medió un suceso de cierta trascendencia, como fue la muerte del chambelán, evento éste que puede fijarse en el año 360 H. (4 nov. 970/23 oct. 971 J. C.) de acuerdo con las noticias que facilitan otras fuentes históricas, y ello recomienda la elección del año 971 (29 ṣafar 360/10 rabī' I 361 H.) como el más cualificado de nuestra era para datar los trabajos de musivaria objeto del presente estudio, ya que su curso coincidió nada menos que con diez meses lunares del 360 de la islámica.

Finalmente, no quedaría completa esta monografía si se dejase de dedicar en ella unas líneas a la policromía de estos mosaicos y al tipo de escritura empleada en las fajas epigráficas que tanto contribuyen a documentarlos, sin restarles ni un ápice de su extraordinario valor ornamental.

Las teselas empleadas en los mosaicos en cuestión son generalmente de pasta vítrea, predominando los colores azul, verde y rojo, las cuales, a consecuencia de los consabidos defectos de fabricación, presentan unas sutiles variantes cromáticas que inculcan encantador dinamismo a cualquier espacio donde, por necesidades de composición, prevalezca una determinada tonalidad. Así, por ejemplo, en la gama de las azules, se advierten los tonos celeste, marino, turquesa y cárdeno; en la de las verdes, los oliva, jade, botella y esmeralda, y en las rojas, los vermellón, púrpura y violáceo. También se emplearon teselas de mármol gris y de piedra calcárea blanca, e igualmente teselas doradas, las cuales presentan una finísima laminita de oro bajo otra de vidrio incoloro igualmente finísima.

Y por lo que respecta a las fajas epigráficas, sus textos están compuestos en caracteres cúficos de traza simple, como fue lo usual en los días de al-Ḥakam II, y presentan la novedad de que los contornos de los signos se diferenciaron del cuerpo de los mismos mediante teselas de distinto color, técnica ésta que, pocos años después, daría lugar a inscripciones de gran impacto decorativo, como la que exorna, por ejemplo, la célebre arqueta de marfil mandada hacer para sí mismo por 'Abd al-Malik, el hijo mayor de Almanzor, en el año 395 H. (18 oct. 1004/7 oct. 1005 J. C.) y que hoy se custodia en la Catedral de Pamplona. (Manuel Ocaña Jiménez.)

¿Qués es un "hoatzin"?

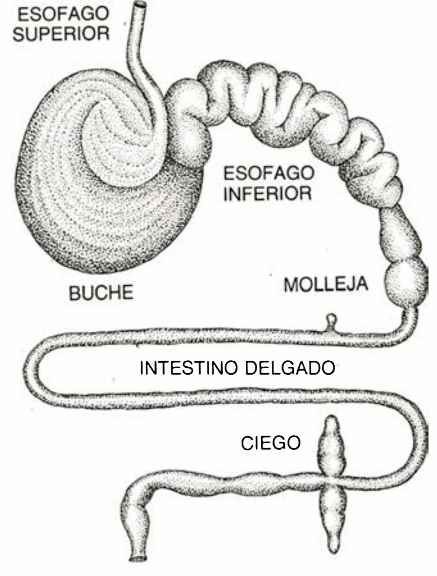
Ante todo, una de las aves más extrañas de la pluviselva del Amazonas. Las crías que aún no saben volar bucean para escapar de sus depredadores. Estos pequeños pájaros pardos presentan garras en sus alas, con que se desplazan por las copas de los árboles como si fueran monos. Los adultos tienen unos ojos de un rojo intenso que destacan en un rostro azul brillante, coronado con un llamativo y moderno peinado; esa testa a la última moda va unida a un cuerpo bastante desgarbado y vulgar.

Quizá el rasgo más característico de esta especie sea el olor a estiércol de vaca que desprende. (Los colombianos llaman a este pájaro *pava hedionda.*) Un grupo de investigadores de Venezuela, Escocia y Estados Unidos ha descubierto la razón: aunque anatómicamente sea un ave, el "hoatzin" tiene costumbres gastronómicas parecidas a las de la vaca.

A diferencia de la mayoría de los pájaros, esta especie se alimenta casi exclusivamente de hojas frescas. Y, lo que es más insólito aún –en realidad, único entre las aves conocidas– es su buche y su esófago, típicos de los rumiantes. Primero el buche, muscular, fuertemente replegado, tritura –o rumia– las hojas. A continuación, las bacterias del buche y el esófago desencadenan la fermentación del "bolo alimenticio", inactivando así las toxinas y produciendo nutrientes que pueden ser absorbidos por el intestino.

La fermentación de los alimentos en el intestino anterior es también característica de vacas, ovejas, ciervos y otros mamíferos. Pero según uno de los investigadores, Stuart D. Strahl, de la Sociedad Zoológica de Nueva York, el pequeño "hoatzin" (los adultos pesan menos de 1 kilogramo) no comparte la rama evolutiva de estos grandes mamíferos rumiantes; ha





4. *TRACTO DIGESTIVO del hoatzin. Las hojas fermentan durante casi dos días en el buche y esófago. (Fotografía de Stuart D. Strahl.)*

desarrollado, por tanto, su sistema digestivo de forma independiente.

Strahl señala ademś que algunos ornitólogos consideran el "hoatzin" una especie "primitiva", porque sus garras son similares a las de *Archaeopteryx*, aunque él cree que se trata de un animal altamente especializado. Los cisnes, los ibis y muchos otros pájaros, observa, tienen garras alares; lo que ocurre es que nunca las utilizan.

Un "hoatzin" vuela con evidente torpeza. Su buche, muy ancho, deja poco espacio para los músculos de las alas. Por supuesto, en la pluviselva no es necesario volar lejos ni rápidamente para encontrar hojas. Como escriben los investigadores en *Science*, "considerando la abundancia de hojas, su fuente alimenticia básica, resulta sorprendente que sólo este ave haya adoptado la fermentación en el intestino anterior como proceso digestivo."

Shannon, en zapatillas

Claude E. Shannon no es capaz de estarse sentado y quieto. Nos encontramos en su casa, un edificio estucado de porte victoriano, que preside un lago al norte de Boston. Me esfuerzo por hacer que Shannon rememore cómo llegó a dar con la teoría de la información. Pero Shannon, a sus 73 años juveniles, con su sonrisa de gnomo y su mata de pelo blanco, está cansado de mirar hacia el pasado. ¿No preferiría yo echar una ojeada a sus juguetes?

Sin esperar respuesta, y venciendo las tibias protestas de Betty, su esposa, Shannon salta de su silla y desaparece en el interior de la habitación vecina. Cuando le alcanzo, me muestra ufano sus siete máquinas ajedrecísticas, un "bastón saltarín" con motor de gasolina, una navaja de 100 hojas, un monociclo de dos asientos y un sinfín de otros maravillosos artilugios. Algunas de sus creaciones personales –como un maniquí malabarista con la efigie de W. C. Fields y una computadora llamada THROBAC, que calcula con números romanos– están algo polvorientos y averiados, pero Shannon parece tan encantado con todo como un chiquillo de diez años la mañana del día de Reyes.

¿Será éste el hombre que, joven ingeniero de los laboratorios Bell, escribió en 1948 la carta magna de la era de la información, "The Mathematical Theory of Communication"? ¿Será la misma persona de cuya obra se ha dicho que es la más grande que recogen "los anales del pensamiento tecnológico"? ¿La misma cuya "intuición innovadora" iguala, según Rolf W. Landauer, investigador numerario de IBM, a la de Einstein? Pues sí. Es también la persona que inventó un cohete "frisbee" a propulsión, la misma que hacía malabarismos mientras se paseaba por las salas de los laboratorios Bell encaramado a un monociclo. "Me he dedicado siempre a los asuntos que me interesaban, sin prestar gran atención ni a su valor económico ni al valor que pudieran tener para el mundo", confiesa. "He invertido un montón de tiempo en cosas totalmente inútiles."

Shannon, ya desde su niñez, se sintió siempre fascinado tanto por las particularidades de la maquinaria como por las generalidades y abstracciones de la matemática. Durante su infancia y su juventud en Gaylord, Michigan, se dedicó a hacer inventos con juegos de construcción y con radios que le proporcionaba su padre, juez, y a resolver problemas matemáticos que le proponía su hermana mayor, Catherine, que llegaría a catedrática de matemática. Realizó sus primeros estudios universitarios en la Universidad de Michigan, graduándose en matemática y en ingeniería eléctrica.

Su familiaridad con ambos campos le permitió tallar la muesca que señalaría el primero de sus grandes éxitos, cuando todavía era estudiante de segundo ciclo en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Shannon, en su tesis de licenciatura, puso de manifiesto que un cálculo lógico-algebraico inventado a mediados del siglo pasado por George Boole para tratar de asuntos como "Si ocurre *X* u ocurre *Y*, pero no *Z*, entonces resulta *Q*" permitiría representar el funcionamiento de los relés y conmutadores de los circuitos electrónicos.

Profundas fueron las consecuencias de aquel trabajo. En nuestros días, los ingenieros aplican rutinariamente el álgebra booleana para proyectar y construir los equipos informáticos, tanto en sus elementos tangibles como en sus soportes lógicos, que se requieren en el diseño de redes telefónicas y otros sistemas. Shannon resta importancia al papel que desempeñó el descubrimiento. "Lo único que ocurrió fue que nadie más se encontraba familiarizado con esos campos a un mismo tiempo", afirma. Y tras un momento de reflexión, añade: "Siempre me ha encantado la palabra 'booleano'."

En 1941, un año después de doctorarse en el MIT, ingresó en los laboratorios Bell. Durante la segunda guerra mundial, su responsabilidad oficial consistía en el desarrollo de sistemas criptográficos, pero en su tiempo libre fue amamantando las ideas que acabarían constituyendo la teoría de la información. La meta inicial de Shannon era sencilla: mejorar la transmisión de información a través de una línea telegráfica o telefónica afectada de interferencias eléctricas, de ruido. La solución óptima, concluyó, no consistiría en mejorar indefinidamente las líneas de comunicación, sino en empaquetar y compactar la información más eficientemente.

¿Qué es la información? Esquivando el problema de definición del significado de esta noción, Shannon puso de manifiesto que consiste en algo mensurable: la cantidad de información de un mensaje dado es función de la probabilidad de que, entre todos los mensajes que podrían enviarse, resultara elegido el dado. Impuso el nombre de "entropía" al potencial global de información de un sistema de mensajes, término que en termodinámica denota el grado de aleatoriedad de un sistema, la medida o el grado en que el sistema está, por así decirlo, hecho un "revoltijo". (Shannon dijo en cierta ocasión que el gran matemático John von Neumann le había instado a utilizar el término entropía, señalando que, como nadie sabe de verdad lo que significa, Shannon llevaría ventaja en los debates sobre su teoría.)

Shannon definió la unidad básica de información, que más tarde se llamaría *bit*, como un mensaje que representase una de dos elecciones: por ejemplo, cara o cruz, sí o no. Es posible codificar en bits grandes cantidades de información, de igual manera que en el viejo juego de las veinte preguntas se puede atinar rápidamente merced a un interrogatorio diestro. Un bit puede ser representado como un 1 o un 0, o como la presencia o ausencia de corriente en un conductor eléctrico.

Construyendo sobre estos cimientos matemáticos, procedió entonces a demostrar que cualquier canal de comunicaciones dado posee una capacidad máxima de transmisión fiable de información. En realidad demostró que, aunque es posible aproximarse a este máximo mediante una codificación sagaz, nunca será posible alcanzarlo por completo. Este máximo ha dado en ser conocido como límite de Shannon.

¿Cómo aproximarse hacia el límite de Shannon? El primer paso consiste en eliminar la redundancia. Un amante lacónico podría escribir "T qr o" en su *billet-doux*; de igual manera, un buen código comprime la información a su forma más compacta. Acto seguido, el código añade la redundancia justa que garantice que el mensaje pelado no quede oscurecido por rui-

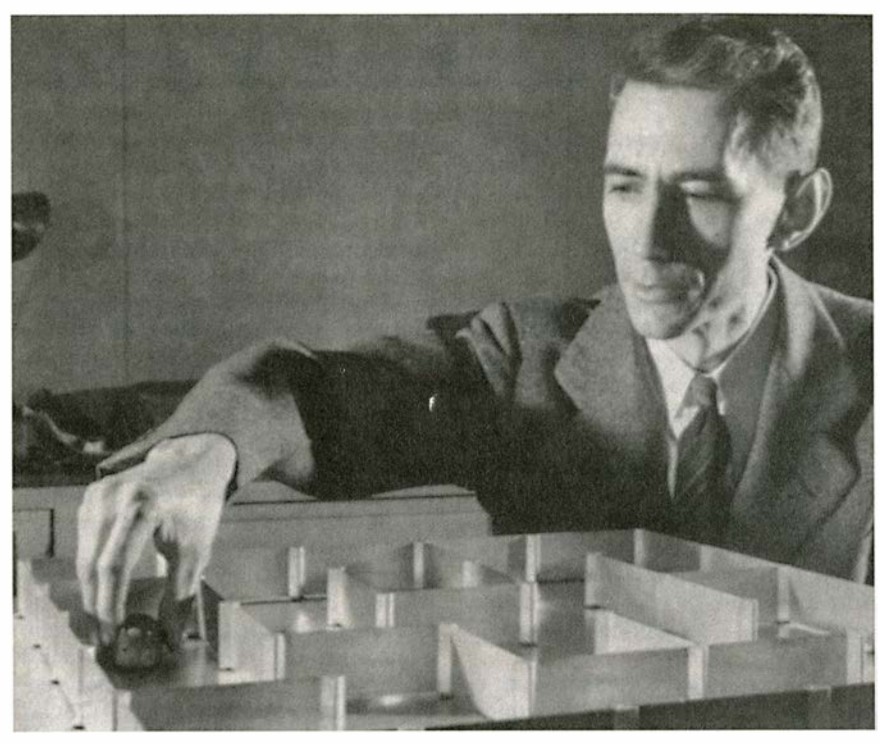
do. Por ejemplo, un código que procesase una ristra de números podría añadir una fórmula polinómica sobre cuya gráfica han de caer todos los puntos. En el extremo receptor, el descodificador sabe que cualesquiera números situados fuera de la gráfica se han alterado por la transmisión.

Las ideas de Shannon fueron casi demasiado prescientes para poder tener efectos prácticos inmediatos. Los circuitos construidos con válvulas electrónicas eran pura y simplemente incapaces de calcular los complejos códigos necesarios para aproximarse al límite de Shannon. De hecho, los ingenieros no pudieron comenzar a sacar pleno partido de la teoría de la información hasta el decenio de 1970, con el advenimiento de circuitos integrados de alta velocidad. En nuestros días, las ideas de Shannon han contribuido a dar forma a casi todos los sistemas que almacenan, procesan o transmiten información en forma digital, desde los discos compactos hasta los ordenadores, desde las máquinas reproductoras hasta las sondas que, como la *Voyager*, penetran profundamente en el espacio.

La teoría de la información se ha infiltrado también en campos ajenos a las comunicaciones, como la lingüística, la psicología, la economía, la biología e incluso, las artes. A comienzos del decenio de 1970, la revista *IEEE Transactions on Information Theory* publicaba un editorial, titulado "Information Theory, Photosynthesis and Religion", que mostraba a las claras dicha tendencia. Empero, el propio Shannon sugiere que quizá no sea tan descabellada la aplicación de la teoría de la información a los sistemas biológicos, pues, desde su punto de vista, los principios subyacentes a los seres vivos y a los objetos mecánicos son los mismos. Cuando se le pregunta si cree que las máquinas pueden pensar, Shannon responde: "Puede apostar a que sí. Yo soy una máquina; usted es una máquina, y ambos pensamos."

De hecho, Shannon fue uno de los primeros ingenieros que propusieron que las máquinas podrían programarse para juegos y para realizar otras tareas complejas. En 1950 construyó "Theseus", una ratita mecánica que podía aprender a salir de un laberinto (guiada por un imán y una masa de circuitos bajo la mesa). La invención inspiró al Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos a poner en marcha un concurso de "microrratones" en el que participan hoy millares de estudiantes de ingeniería.

Construyó una máquina "de lectura del pensamiento", que jugaba a "cara o cruz", juego en el que cada participante trata de adivinar qué ha elegido el adversario. Un colega de los laboratorios Bell, David W. Hagelbarker, construyó el prototipo; la máquina registraba y analizaba las elecciones pasadas de su contrincante, buscando regularidades que le permitieran predecir la elección siguiente. Como a los humanos les resulta casi imposible no caer en tales pautas, la máquina ganaba más del 50 por ciento de las veces. Shannon construyó entonces su propia versión y desafió con ella a la máquina de Hagelbarker, en un duelo legendario. La máquina de Shannon ganó.



5. THESEUS, el ratón mecánico, junto a Claude E. Shannon, su inventor, en una fotografía de 1952. El ratón "aprende" a salir de un laberinto con la ayuda de un imán guiado por los circuitos ubicados bajo el tablero.

En 1956 dejaba los laboratorios Bell para ocupar una cátedra en el MIT. Desde su jubilación académica, en 1978, su gran obsesión ha sido el malabarismo. Ha construido varias máquinas malabaristas y ha concebido la que podríamos llamar "teoría de campo unificado" del malabarismo: sea B el número de bolas, M el número de manos, D el tiempo que cada bola descansa en una mano, T el tiempo de vuelo de cada bola y V el tiempo que cada mano está vacía; entonces $B/M = (D+T)/(D+V)$. (Desafortunadamente, la teoría jamás ha ayudado a Shannon a superar su récord personal, que es de cuatro bolas a la vez.) Ha desarrollado diversos modelos matemáticos de la bolsa de valores, que ha ensayado –con éxito, según dice– con su propia cartera. Incluso ha probado mano en poesía: entre sus obras se cuenta *A Rubric on Rubik Cubes*.

Empero, desde finales del decenio de 1950, poco ha sido lo publicado por él sobre teoría de la información. Algunos de sus antiguos colegas de Bell sugieren que Shannon "se quemó" y se habría cansado de la especialidad que él mismo creara, cosa que niega. Shannon dice que continuó estudiando diversos problemas de teoría de la información, cuando menos a lo largo del decenio de 1960, pero que no consideró sus investigaciones suficientemente dignas de publicación. "Casi todos los grandes matemáticos realizaron sus mejores obras en la juventud", se excusa.

En 1985, Shannon y su esposa decidieron por un súbito impulso visitar el Simposio Internacional sobre Teoría de la Información, que se celebraba en Brighton, Inglaterra. Hacía muchos años que no asistía a ningún congreso y al principio nadie se fijó en él. Pero luego la noticia voló como el viento: aquel caballero de pelo cano que merodeaba por las sesiones técnicas era Claude E. Shannon. En el banquete, Shannon pronunció unas palabras, hizo un breve malabarismo con tres bolas y les firmó después autógrafos a una larga cola de ingenieros. En palabras de Robert J. McEliece, del Instituto de Tecnología de California, "fue como si Newton hubiera hecho acto de presencia en un congreso de física".

Ciencia y empresa

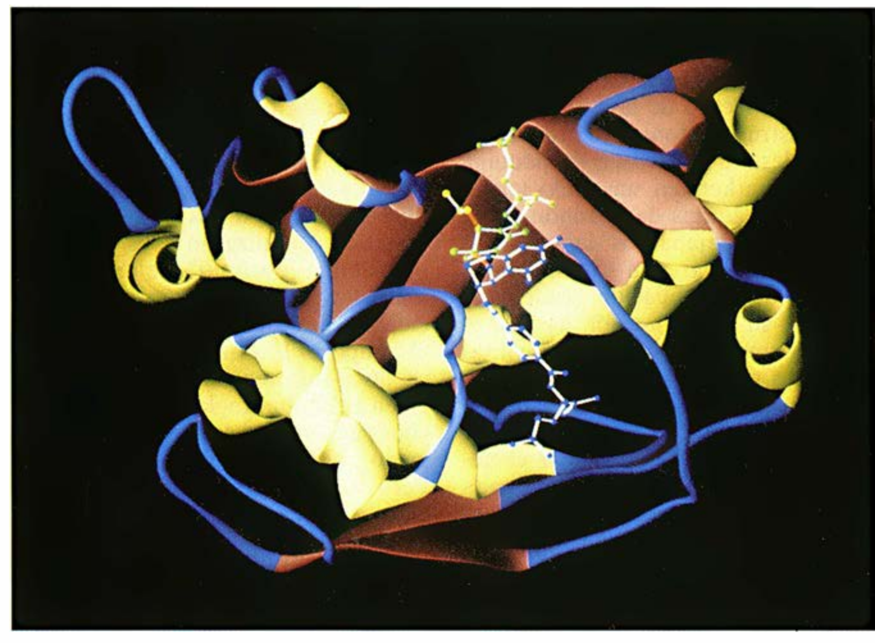
Fármacos racionales

En 1970, el equipo investigador de los laboratorios Squibb se encontraba en un aprieto. Mediante cuidadosas aproximaciones sucesivas, habían creado un medicamento dotado de capacidad para combatir la hipertensión. Sin embargo, las perspectivas de su comercialización parecían remotas: obtenido a partir del veneno de una víbora brasileña, la producción del fármaco en cuestión resultaba prohibitivamente cara y se había de administrar por vía intravenosa.

Los investigadores sabían que el medicamento inhibía la acción de la enzima convertidora de angiotensina (ECA), factor esencial en la bioquímica de la hipertensión sanguínea. Y entonces se les ocurrió que quizá valdría la pena empeñarse en la producción de una molécula sintética que bloquease la acción de la enzima. La verdad es que esa idea, o sueño, venía de lejos. El esfuerzo de los investigadores de Squibb rindió su fruto, gracias, todo hay que decirlo, a la arquitectura altamente específica de la ECA. En 1975 sintetizaron el captopril, que se convirtió en el primero de una familia de inhibidores de ECA y en el primer medicamento "elaborado racionalmente".

Los inhibidores de ECA son, de momento, los más sobresalientes de cuantas drogas así fabricadas han alcanzado el mercado. Pero ayudados por la tecnología de modelado por ordenador, que permite a los investigadores representar en pantalla la estructura atómica de las moléculas de interés, las empresas han comenzado a hacer uso de los métodos racionales de proyecto para acelerar el desarrollo de nuevos medicamentos y reducir los costos. "En el desarrollo racional de los medicamentos se encierra la llave del futuro", dice Brian W. Metcalf, vicepresidente de SmithKline Beecham. "Estamos a punto de agotar los procedimientos tradicionales".

Los investigadores farmacéuticos se apresuran a señalar que los métodos tradicionales de aproximaciones sucesivas no eran irracionales, sino que dependían bastante del albur. Por contra, los bioquímicos que emplean las técnicas racionales de elaboración recrean estructuras moleculares específicas para bloquear la acción de una enzima u otras funciones parecidas.



1. MODELO DE ORDENADOR de la estructura tridimensional de una enzima, la timidilatosintasa (estructura en forma de cinta)*; gracias al mismo, los investigadores de Agouron Pharmaceuticals han creado un inhibidor* (estructura en forma de cuerda) *que ceñirá estrechamente la enzima y bloqueará su acción. (Soporte lógico desarrollado por M. Carson.)*

Squibb, que se fusionó en octubre de 1989 con Bristol-Myers, está realizando ya los ensayos de su próxima generación de medicamentos contra la hipertensión. Upjohn, Abbott y Merck experimentan con inhibidores que cortan la cascada enzimática que eleva la presión sanguínea en una fase ligeramente anterior a aquella en la que intervienen los inhibidores de ECA. Abbott trabaja también en un agente terapéutico contra la enfermedad de Parkinson; Merck lo hace en un fármaco para los trastornos de próstata. SmithKline Beecham y Genetech investigan en quimioterapias de diseño racional contra el SIDA.

Otras compañías menores y jóvenes, aunque pujantes, ven también un importante papel en el desarrollo racional de los medicamentos. Agouron Pharmaceuticals, de La Jolla, California, que se ha concentrado exclusivamente en ese campo, desde que se fundó en 1984, está trabajando en un inhibidor para una enzima esencial contra la proliferación desordenada de las células cancerosas. BioCryst, de Birmingham, Alabama, espera mejorar la eficacia de los fármacos quimioterapéuticos tradicionales en su bloqueo de enzimas que atacan a los agentes en su camino hacia los tumores. Y Vertex Pharmaceuticals, de Cambridge, Massachusetts, fundada hace escasamente un año, se afana en la fabricación de supresores contra trastornos autoinmunitarios tales como forunculosis, artritis reumática y diabetes.

Las empresas farmacéuticas deseosas de explotar la concepción racional de las drogas han de remontar todavía formidables obstáculos. Hay escasez de investigadores adiestrados en estas técnicas. Además, antes de idear el inhibidor, los expertos deben crear en la pantalla la estructura tridimensional de la proteína a la que apuntan; para ello, se han venido apoyando en proteínas cristalizadas, cuyo examen lo facilita la cristalografía de rayos X. Ahora bien, el cultivo de cristales bien formados es difícil. "No existe el

elixir de amor número nueve", se lamenta Alexander McPherson, pionero en este campo y fundador de Crys-chem en Riverside, California.

Mediante la agitación de grandes cantidades de proteínas las técnicas de recombinación han mejorado las probabilidades de obtener cristales aprovechables, reconoce Peter Johnson, director ejecutivo de Agouron. Y según Charles E. Bugg, de la Universidad de Alabama en Birmingham, "en el espacio se desarrollan cristales mejores que los jamás obtenidos en la Tierra". En un número reciente de *Science*, Bugg, McPherson y 22 de sus colaboradores daban cuenta de la feliz creación de cristales a bordo del transbordador espacial *Discovery* en septiembre de 1988. Unos 50 grupos están esperando su oportunidad para enviar sus proteínas al espacio. BioCryst y otras empresas incluso confían en establecer compañías de servicios que cultiven cristales en el espacio para otros.

Pero el modelado racional de específicos no suprimirá todos los demás métodos tradicionales, prevé Yvonne C. Martin, directora de proyectos en Abbott. Pero sí "altera, en sus cimientos, la manera de practicar el arte", exigiendo investigadores con conocimientos más especializados. Y aunque tales métodos puedan producir más rápidamente determinado específico, la fase más larga del ciclo de desarrollo del fármaco —es decir, los ensayos clínicos con seres humanos— permanece obligada.

Tensaiji

"*El clavo que sobresale recibe un martillazo*."

—Refrán japonés

En una nación de hombres de negocios conservadores, Kazuhiko Nishi es un clavo que resiste el martilleo. Abandonó sus estudios en la prestigiosa Universidad Waseda para crear su propia empresa; antes de los 30 años había adquirido reputación de profeta de la era del ordenador personal. Ahora, a los 33, puede preciarse de otro éxito. El pasado septiembre, su compañía, la ASCII Corporation, se convirtió en el primer fabricante de soporte lógico para ordenadores personales que cotizó sus acciones en la Bolsa de Tokio.

En algunos países de Occidente se tiende a considerar el talento y energía de sus jóvenes emprendedores como su mejor activo. Japón goza de un capital similar. Abundan los hombres jóvenes que, como Nishi, son los espíritus gemelos —y los futuros competidores— de los emprendedores empleadillos que ejemplifican el espíritu "del garaje a la riqueza" del Valle californiano del Silicio.

En su adolescencia, Nishi quedó cautivado por el potencial que vislumbró en los primitivos ordenadores personales. En 1977, él y dos amigos aportaron 10.000 dólares cada uno para echar a andar ASCII y publicar un boletín de novedades informáticas. Un año después, Nishi voló a los EE.UU. para visitar a otro joven emprendedor, William Gates, cuya floreciente compañía, Microsoft, vendía soporte lógico para ordenadores personales. Nishi persuadió a Gates; ASCII vendería ese soporte en el Japón.

El empresario japonés se apuntó rápidamente algunos notables éxitos. Convenció a la gigantesca NEC Corporation para que construyera el primer ordenador personal (PC) nipón con la ayuda de Microsoft. Nishi convenció después a Kyocera, importante empresa de cerámicas, para fabricar un ordenador portátil proyectado por Gates y él. Mientras Microsoft se convertía en una palabra familiar en la jerga informática de Occidente, ASCII crecía hasta erigirse en el mayor proveedor de soporte lógico para ordenadores personales de su país.

Nishi y Gates se separaron en 1986 a raíz de ciertas discrepancias, según se ha publicado. Nishi creía que los vendedores de soporte lógico debían proyectar microprocesadores especializados para controlar determinados aspectos del funcionamiento de los PC, en vez de confiar en el soporte lógico del sistema operativo. En consecuencia, Nishi amplió el negocio de ASCII con publicaciones de revistas y desarrollo de soporte lógico, amén de incluir diseños en gran escala de circuitos integrados y redes de comunicación, entre otros nuevos campos.

"En lo que yo soy experto, y lo que constituye nuestra actividad nuclear, es la tecnología aplicada: esto es, cogemos la onda de la tecnología básica (verbigracia, la integración en gran escala) y llevamos a cabo nuestra investigación y desarrollo con la idea de un producto en la cabeza", explica Nishi. Como ASCII subcontrata la fabricación, observa, "podemos hablar con todo el mundo. Todas las compañías japonesas son clientes nuestros, como lo son muchas firmas extranjeras. Todos nos ofrecen sugerencias".

Algunas de ellas son peticiones veladas: el ordenador personal portátil de Zenith Data System, llamado MinisPort, incluía un microcircuito controlador de pantalla proyectado por ASCII. Pero el prototipo de ASCII fue rechazado por Zenith; el microcircuito se hubo de reproyectar para hacerlo compatible con los productos de IBM. "Muchos de nuestros conjuntos de microcircuitos que dejaron de venderse lo hicieron a causa de que desistimos de desarrollarlos al ser rechazados por el cliente", reconoce Nishi, pero "en todos los casos en que escuchamos a nuestros clientes y reproyectamos el microcircuito, éste tuvo éxito".



2. KAZUHIKO NISHI fundó su empresa, ASCII Corporation, hace unos trece años; entre los muchos paquetes de soporte lógico de ASCII está el MSX, un sistema operativo para ordenadores personales basado en el MS-DOS de Microsoft.

La ruptura con Microsoft no frenó la expansión de ASCII. Las ventas subieron alrededor del 20 por ciento en el año fiscal 1989, totalizando unos 165 millones de dólares (una quinta parte del beneficio bruto de Microsoft). Sin embargo, los beneficios se han reducido: ASCII registró un beneficio neto algo superior a los 2 millones en 1989, en gran parte a causa del impacto de las inversiones realizadas en la diversificación de ASCII, según los analistas de Tokio.

Los observadores dicen que vale la pena vigilar a Nishi. Después de todo, como señala Peter G. Wolff, de Kidder, Peabody & Company en Tokio, Kazuhiko Nishi "surgió del torbellino de cientos de compañías de soporte lógico que hay aquí, y lo hizo a su manera".

Las primeras fotografías en color

Las primeras tentativas de captación de imágenes en color fueron complejas y poco prácticas, pero no estuvieron exentas de creatividad e ingenio

Grant B. Romer y Jeannette Delamoir

Es frecuente suponer que la fotografía en color es logro moderno, una presunción debida, en buena parte, a que los ejemplos de imágenes fotográficas del siglo XIX que, por lo común, encontramos son sensiblemente monocromáticas. Y, sin embargo, la moderna fotografía en color debe su existencia a investigaciones realizadas en la centuria pasada. De hecho, los comienzos de la fotografía en color antedatan, incluso, a la presentación comercial del daguerrotipo, cuyo 150 aniversario celebrábamos el año pasado.

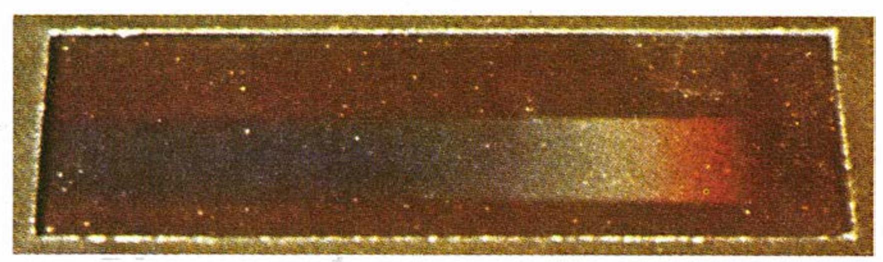
Los primeros ideadores de la fotografía dieron por supuesto que las imágenes fotográficas serían imágenes en color. Las imágenes que las lentes proyectaban eran imágenes en color. ¿Por qué habría de ser diferente la imagen resultante? Por ello, las primeras tentativas de fotografía en color se esforzaron en conseguir su reproducción directa; esto es, pretendían servirse de un único compuesto fotosensible para registrar la totalidad del espectro visible. Se conocían muchas sustancias que cambiaban de color por exposición a la luz; algunas tomaban incluso los verdaderos colores de ésta.

GRANT B. ROMER y JEANNETTE DELAMOIR han trabajado conjuntamente en el Museo Internacional de Fotografía (IMP) de la George Eastman House, en Rochester, Nueva York. Romer, conservador de las colecciones fotográficas del museo, es especialista en fotografía decimonónica. Ha dedicado los últimos meses a realizar daguerrotipos para el Museo Carnavalet de París, en conmemoración del 150 aniversario de la fotografía. Delamoir fue catalogadora en el IMP entre enero y agosto del año pasado.

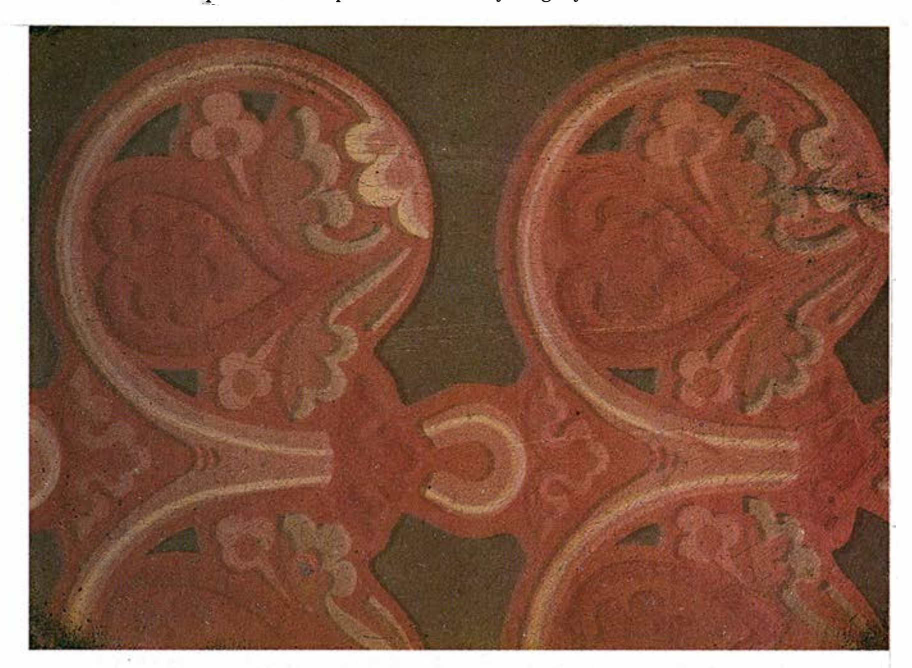


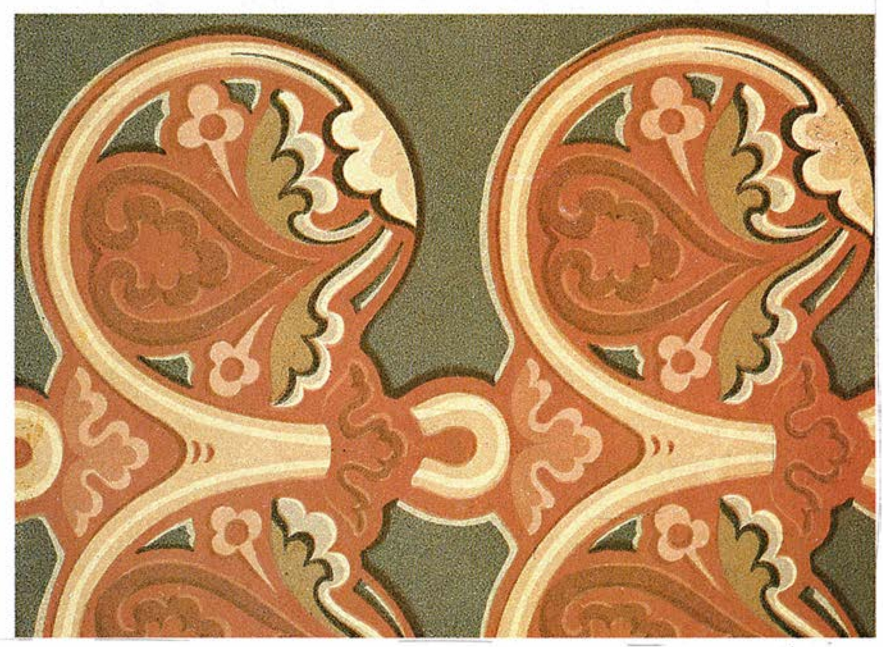
1. MADURACION DE LA FOTOGRAFIA EN COLOR, representada en esta yuxtaposición de un daguerrotipo iluminado a mano **(arriba)** *y una fotografía en color que data de 1907* **(derecha)**. *Aunque los daguerrotipos obtuvieron un éxito inmediato tras su introducción en 1839, pocos de los primeros procesos en color lograron viabilidad comercial. La fotografía en color que vemos aquí fue realizada mediante la técnica de "Autochrome", proceso que consistía en filtrar la luz a través de granos de almidón de patata teñidos de rojo-anaranjado, verde y violeta* **[véase la figura 7]**.





2. ESPECTRO CROMATICO producido, en 1848, por el físico francés Edmond Becquerel, que se conserva en el Museo de la Ciencia de Londres. Becquerel depositó cloruro de plata sobre una placa de daguerrotipo y la expuso a luz descompuesta por un prisma; el compuesto tomó los tonos de la luz refractada. Los métodos directos de reproducción de color de este tipo dominaron los primeros experimentos de fotografía en color.





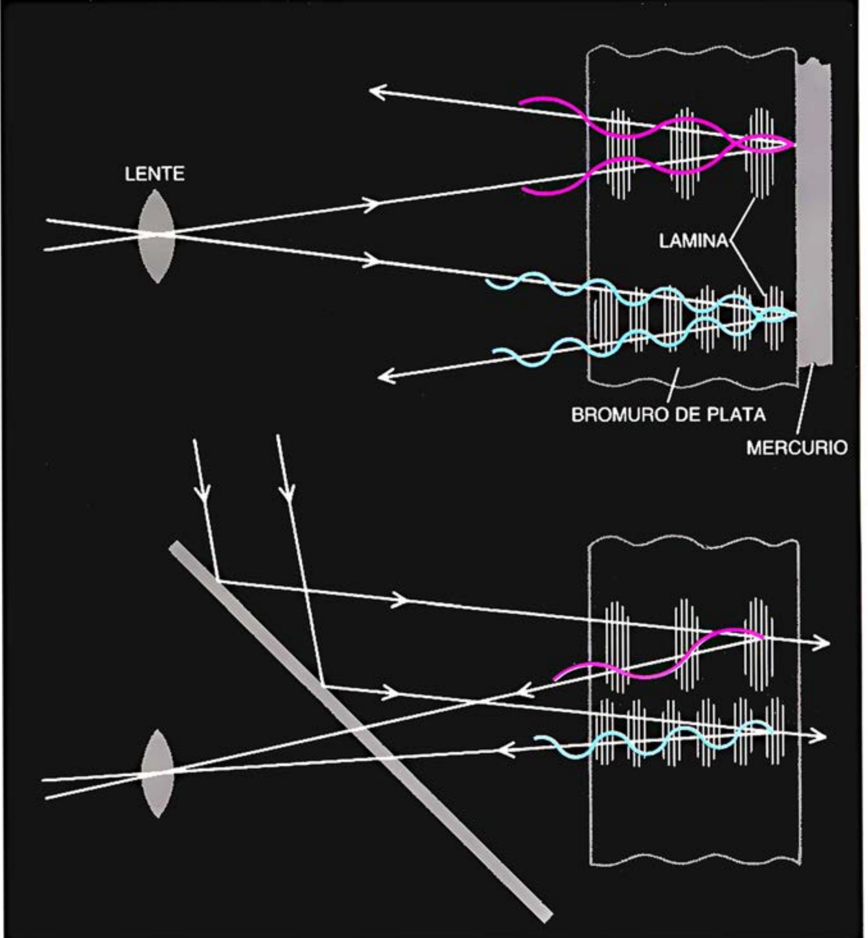
3. UNA IMAGEN DE CONTACTO **(arriba)**, *ilustrativa de otro método de reproducción directa del color. El francés Claude Niépce de Saint-Victor produjo esta imagen a mediados del siglo pasado, por exposición de una placa de plata superficialmente atacada por cloro puesta en contacto con un motivo gráfico* **(abajo)**, *probablemente, un pedazo de papel de pared.*

Thomas Johann Seebeck, un físico alemán que trabajaba estrechamente con Goethe en las investigaciones de este polígrafo sobre el color, publicó, en 1810, sus observaciones sobre la respuesta del cloruro de plata al serle proyectada una imagen del espectro. Seebeck extendió cloruro de plata húmedo sobre papel y expuso seguidamente este papel a luz descompuesta por un prisma, durante 15 o más minutos. El cloruro de plata así expuesto tomó algunos de los colores del espectro, si bien débilmente. Seebeck no pudo explicar el fenómeno. (Ni nadie, hasta 1868.)

Louis-Jacques-Mandé Daguerre, de profesión pintor paisajista, comenzó sus experimentos en el decenio de 1820, con la esperanza de reproducir el color por medio de diversos minerales fosforescentes. En 1826, Joseph-Nicéphore Niépce, inventor francés, tomó la que hoy es la más antigua de las fotografías supervivientes, una imagen de un granero, realizada exponiendo una placa de peltre recubierta con una disolución de asfalto; la luz provocó la polimerización del asfalto, tornándolo insoluble y produciendo así una imagen monocromática.

Daguerre y Niépce se convirtieron en colaboradores y comenzaron a experimentar con placas plateadas, que exponían a vapores de yodo. Cuatro años después de la muerte de Niépce, acaecida en 1833, Daguerre estableció el procedimiento para realizar daguerrotipos, cuyo secreto guardó hasta 1839. Aproximadamente por esta fecha, un científico aficionado inglés, William Henry Fox Talbot, estableció los fundamentos de la fotografía negativo-positivo sobre papel, inventando un sistema al que más tarde llamaría calotipia.

El daguerrotipo constituyó el primer proceso fotográfico verdaderamente práctico. Las imágenes se producían por exposición, en una cámara, de una placa de cobre plateada, previamente tratada con vapores de yodo. Para tornar visible la imagen latente de la placa, se la exponía al vapor de mercurio metálico, que formaba una amalgama con la plata, allí donde la placa había sufrido exposición a la luz; el efecto combinado de dispersión de luz por la amalgama y la reflexión de luz por el sustrato plateado creaba una imagen positiva. El proceso fue perfeccionado varios años después de su introducción, utilizándose otros halógenos, como bromo o cloro, en lugar del yodo, para acelerar la velocidad de exposición de la placa. En el proceso de Talbot, so-



4. PROCESO LIPPMANN, *último intento serio de aplicar la reproducción directa de colores. El físico francés Gabriel Lippmann inventó el sistema por los años noventa del siglo pasado, basándose en nuevas teorías de las ondas luminosas y en emulsiones de nuevos tipos. Lippmann recubrió de bromuro de plata una placa de cristal (no mostrada) y colocó la placa en una cámara, de modo que el recubrimiento quedara en contacto con una lámina de mercurio líquido. La luz que penetraba en la cámara atravesaba la emulsión y se reflejaba en el mercurio; las "ondas estacionarias" que se formaban provocaban que la plata de la emulsión se segregase en láminas, separadas entre sí por una longitud de onda* **(arriba, derecha)**. *Observada la placa desde cierto ángulo, las láminas reflejaban la luz de las mismas longitudes de onda (esto es, de los mismos colores) que las habían creado* **(abajo, derecha)**, *haciendo nacer tonos vivos, como los de esta fotografía de Versalles, tomada por Lippman en 1890.*



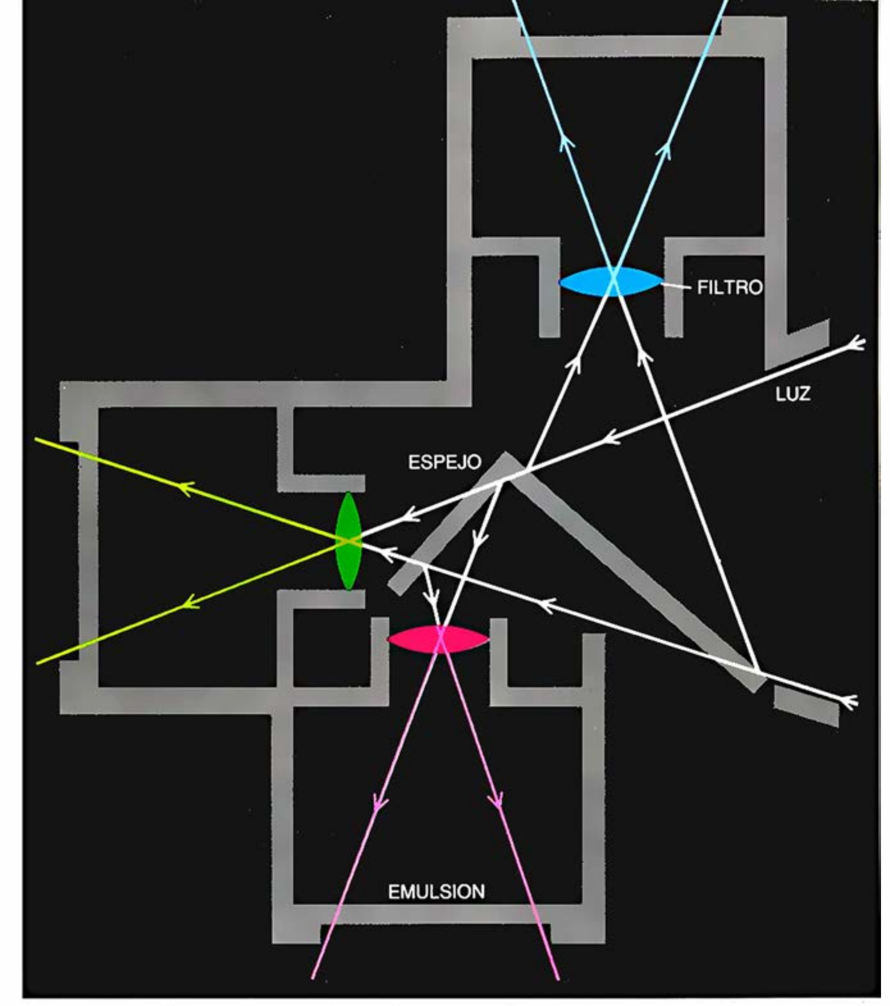
bre papel, se utilizaba también cloruro de plata. Talbot se valía de papel saturado de este compuesto al objeto de hacer copias positivas, por contacto a partir de negativos en papel.

Merced a estos procedimientos, Daguerre, Talbot y sus colegas y clientes lograron, a veces, resultados fuertemente coloreados, aunque monocromáticos; es decir, la superficie del daguerrotipo reflejaba vívidamente uno de los colores, pero no otros. La falta de color de la copia era compensada en ocasiones por coloreado a mano, que podía ser exquisitamente sutil y eficaz [*véase la figura 1*]. No obstante, el deseo de registrar los colores de la naturaleza subsistió con gran vigor en los investigadores, que ansiaban ampliar las fronteras de la fotografía.

Se produjo un renovado interés por los experimentos de Seebeck sobre el color. Los experimentos de Seebeck fueron repetidos, en 1840, por el astrónomo inglés Sir John F. W. Herschel, consignando las propiedades espectrales de diversas sales de plata. El trabajo de Herschel captó la atención del físico francés Edmond Becquerel, quien comenzó, en 1847, a registrar espectros de colores extendiendo fina y homogéneamente cloruro de plata sobre una placa de daguerrotipo, en lugar de sobre papel. Los resultados de Becquerel eran francamente esperanzadores. Uno de sus registros en color se conserva hoy en el Museo de la Ciencia de Londres [*véase la figura 2*].

Claude Niépce de Saint-Victor, sobrino de Joseph Niépce, retomó el trabajo de Herschel en 1851 y lo mejoró, cambiando la deposición del cloruro de plata y preservando los colores con barniz. Una de sus brillantes reproducciones espectrales se exhibe en el Museo Nacional de Artes y Oficios de París. Niépce de Saint-Victor procedió a captar naturalezas muertas tomadas con cámara mediante sus placas cubiertas de cloruro de plata. Realizó igualmente imágenes de contacto sobre papel a partir de diseños gráficos coloreados [*véase la figura 3*].

El proceso de Niépce de Saint-Victor no resultaba viable desde el punto de vista económico, porque las imágenes no se podían fijar adecuadamente y porque los tiempos de exposición requeridos para registrar todos los colores eran excesivamente largos (hasta una hora). Este trabajo ofrece, empero, un aspecto interesante. En 1851, el mismo año en que Niépce de Saint-Victor comenzaba sus experimentos en color, un pastor y daguerrotipista norteamericano, de nombre Levi L. Hill, proclamó haber descubierto un proceso de obtención de daguerrotipos en color. Hill logró reunir 15.000 dólares de suscriptores curiosos, pero nadie pudo reproducir sus resultados y acabó siendo rechazado por falsario. Pero un daguerrotipista de nuestro tiempo, Joseph W. Boudreau, del Colegio de Arte Paier, de Hamden, Connecticutt, obtuvo imágenes en color ajustándose a las instrucciones publicadas por Hill.



5. CAMARA DE DUCOS DE HAURON **(arriba)**: *capturaba indirectamente los colores, efectuando registros de los colores rojo, azul y verde. El inventor francés Louis Ducos du Hauron proyectó la cámara, dotándola de espejos semiplateados, que escindían la luz en tres haces distintos, y de filtros destinados a aislar la contribución de cada color primario. Las emulsiones disponibles hacia 1870 carecían de sensibilidad suficiente para servir en esta cámara, aunque, mediante penosos procedimientos, Ducos de Hauron logró obtener fotografías en color como la naturaleza muerta que vemos a la izquierda, realizada en 1877.*

Además, el examen de diversas imágenes de Hill ha puesto de manifiesto que su color era, al menos en parte, consecuencia de un proceso fotográfico. De hecho, el proceso de Hill parece haber sido bastante semejante a los utilizados por Becquerel y Niépce de Saint-Victor.

En 1868, el físico alemán Wilhelm Zenker propuso que la interferencia de ondas luminosas en el medio fotográfico era responsable de la facultad de las placas de cloruro de plata para reproducir el color. Zenker afirmaba que las ondas luminosas interactuaban con el cloruro de plata, refractante, y la superficie, reflejante, de la plata pulida, con formación de ondas estacionarias, esto es, ondas cuyos valles y senos coinciden en el espacio aunque se van alternando en el tiempo [*véase la figura 4*]. En los puntos donde crestas y senos coinciden, sostenía Zenker, el cloruro de plata queda expuesto, creando así láminas de plata; en los nodos entre senos y crestas, el cloruro de plata no sufre exposición a la luz. Examinadas después con luz blanca (luz formada por toda la gama de frecuencias visibles), las láminas de plata reflejarían sólo las longitudes de onda que las crearon; reflejarían sólo el color particular al que en un principio se había expuesto el cloruro de plata.

La teoría de Zenker de las ondas luminosas estacionarias fue confirmada por el físico alemán Otto Wiener en 1889; el trabajo de Wiener permitió en 1891 realizar, efectivamente, fotografías en color directas y fijables. El ingenioso sistema fue ideado por Gabriel Lippmann, físico francés. Lippmann sacó partido de las emulsiones fotosensibles introducidas en el decenio de 1850, que se adherían a una lámina de vidrio. Colocó una lámina de vidrio cubierta con una emulsión de bromuro de plata de grano fino en un soporte que ponía a la emulsión en contacto con una hoja de mercurio líquido. El mercurio hacía de espejo, exactamente igual que lo hiciera la plata en la placa de daguerrotipo de los experimentos de Niépce de Saint-Victor.

Lippmann instaló el soporte en una cámara y expuso la emulsión. La luz viajó a través de la placa de cristal y de la emulsión, chocó contra el espejo de mercurio y rebotó sobre sí misma, creando así ondas estacionarias. Durante el revelado, se formaban a partir del bromuro láminas de plata de anchura mitad que la longitud de onda de la luz que las creó.

La imagen revelada ofrecía el aspecto de una imagen negativa normal, hasta que se observaba bajo cierto ángulo. A ese ángulo particular, la luz que se reflejaba desde la superficie de la imagen originaba brillantes colores, fieles a los tonos y matices naturales. A pesar de que el proceso de Lippmann comportaba largos tiempos de exposición y de que el manejo del mercurio no carecía de dificultades, los colores fijados eran tan hermosos que el sistema disfrutó de vida comercial hasta 1907.

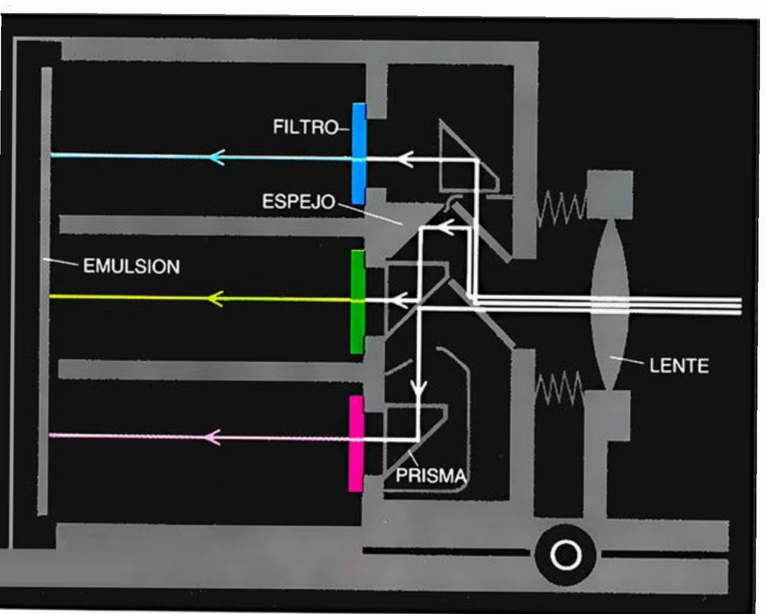
En dicho año, la técnica de Lippmann fue suplantada por métodos indirectos de producción de imágenes en color: métodos de reconstrucción del espectro cromático por combinación de los colores primarios rojo, azul y verde. Los métodos indirectos establecidos en el siglo pasado se convierten en el fundamento de la moderna fotografía en color. Para comprender la evolución de dichos métodos, es necesario retroceder nuevamente hasta los días que antecedieron al daguerrotipo.

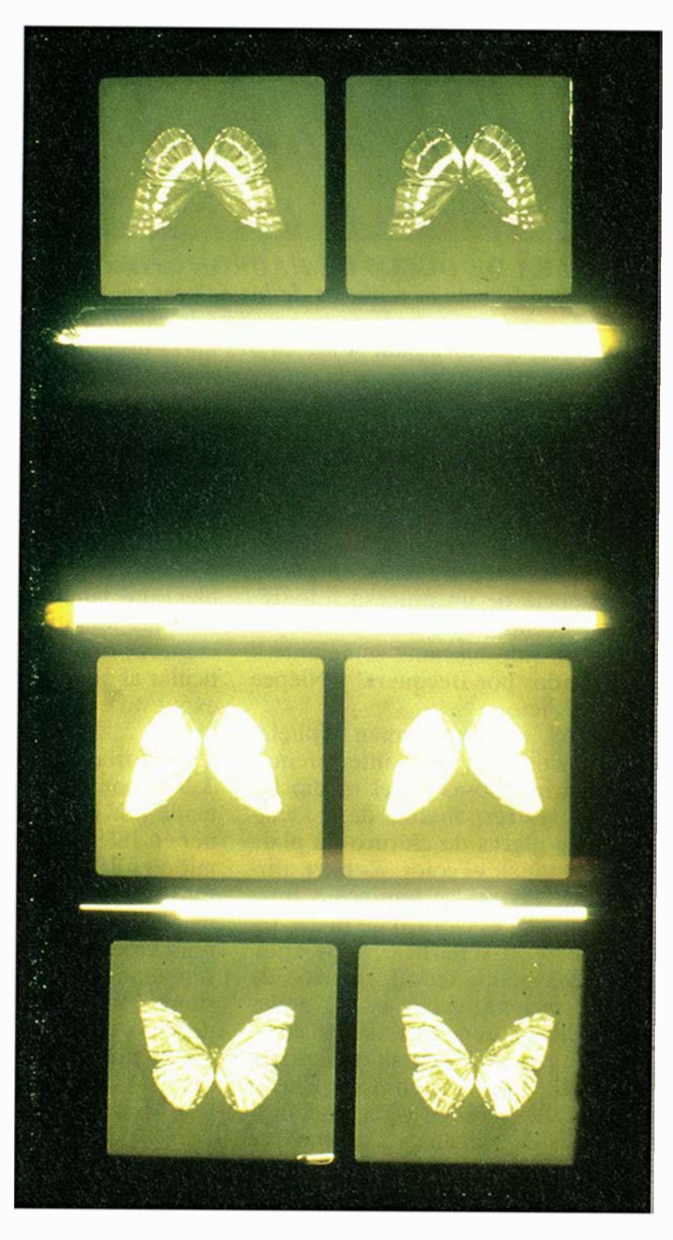
En 1801, el médico y físico inglés Thomas Young presentó a la Regia Sociedad de Londres una teoría de la visión de los colores que predecía la existencia, en el ojo humano, de tres tipos de receptores de color, cada uno de ellos sensible a uno de los tres colores primarios. Mezclados en proporciones variables, los colores primarios estimularían las combinaciones de receptores adecuadas que originasen la percepción de todos y cada uno de los tonos. La disertación de Young constituye un hito histórico, pues, por vez primera, se reconocía que el color era un fenómeno fisiológico y no una sustancia material. Su teoría, juntamente con los avances de la impresión en color por superposición de tres o más colores, preparó el camino para la realización de experimentos fotográficos con color indirecto.

Los primeros experimentos fueron tentativas de reproducir el proceso de percepción visual registrando por separado los tres componentes primarios del color, para luego recombinarlos y presentar una imagen a todo









6. *CAMARA Y VISOR KROMSKOP* **(serie superior)**; *operaban según los principios establecidos por Ducos de Hauron. En 1895, época en que el inventor norteamericano Frederic E. Ives se aprestaba a la producción comercial de estos dos aparatos, la mayor sensibilidad de las emulsiones había hecho factibles estos aparatos. Para descomponer la luz en colores primarios, la cámara se valía de espejos semiplateados y prismas* **(arriba)**. *La ruta de los haces era tal que la luz recorría en los tres una misma distancia antes de llegar a las emulsiones. Un modelo más elaborado del Kromskop disponía de dos lentes y tomaba fotografías estereoscópicas* **(derecha)**.

color. La mayoría de los sistemas separaba los colores primarios formando tres negativos monocromáticos por exposición a través de filtros rojo, azul y verde. Los tres negativos eran subsecuentemente positivados y recombinados, fuese por métodos "aditivos" o "sustractivos".

Los métodos aditivos reconstruyen imágenes mezclando conjuntamente la luz de los tres colores primarios. La mezcla puede conseguirse proyectando, a la vez, tres imágenes coloreadas, o por yuxtaposición de pequeñas líneas o puntos de colores primarios, con lo que el ojo mezcla los colores. Los sitemas sustractivos, por otra parte, utilizan tintes de los colores complementarios –azul cian (azul-verde), magenta (azul-rojo) y amarillo (verde-rojo)– cada uno de los cuales absorbe selectivamente uno de los primarios, mientras consiente la percepción de los otros dos. El cian absorbe la luz roja; el magenta, la luz verde, y, el amarillo, la luz azul.

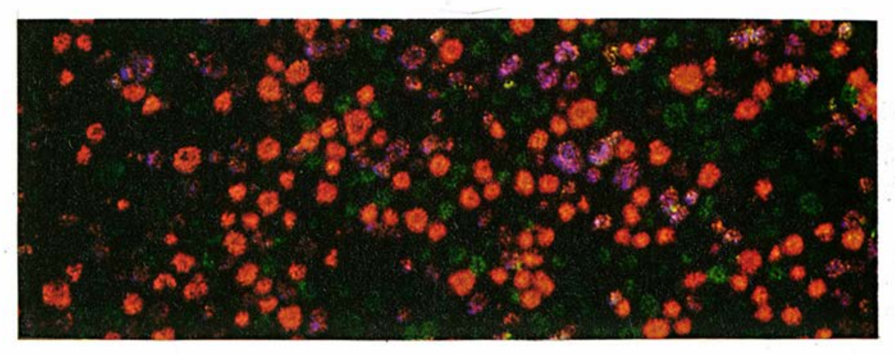
El primero en demostrar la viabilidad del proceso aditivo en fotografía fue el físico británico James Clerk Maxwell. En una demostración ante el Instituto Real de Londres, Maxwell superpuso en una linterna mágica tres transparencias positivas e incoloras de una cinta para el pelo. Cada transparencia había sido fotografiada a través de un cristal de color o un líquido teñido; Maxwell proyectó cada una a través de un filtro del mismo color. La combinación de imágenes obtenida recreó toda la variedad de colores de la cinta.

Maxwell realizó este experimento con el objeto de poner a prueba sus trabajos en colorimetría (medición del color), y se contentó con ello. Pero su demostración no resolvía los problemas de los fotógrafos. Las emulsiones disponibles en aquel entonces eran mucho más sensibles a la luz azul que a las demás y, a pesar incluso de todos los ajustes compensatorios de los tiempos de exposición del verde y el rojo, las imágenes correspondientes no llegaban a quedar tan plasmadas como las azules.

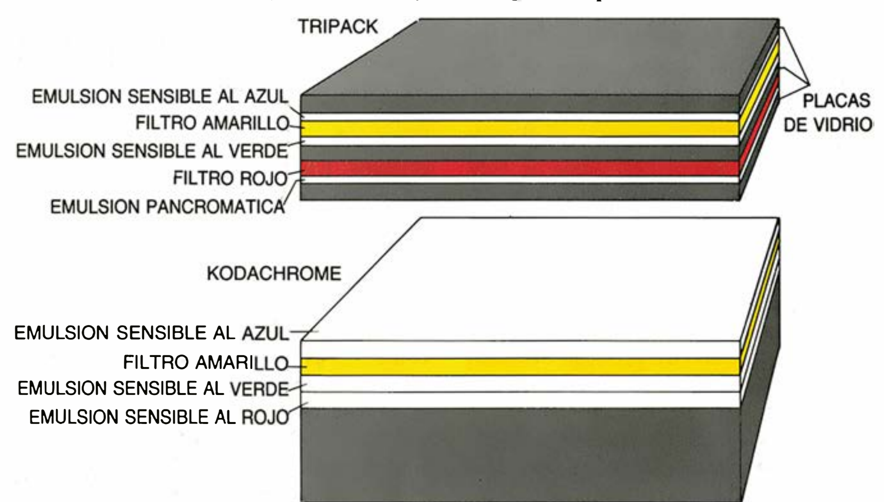
En 1862, un año después de la demostración de Maxwell, un francés de 25 años, llamado Louis Ducos de Hauron, revisó los fundamentos de la práctica totalidad de los sistemas de fotografía en color entonces existentes, y propuso el que llegaría a ser la base de todos los sistemas utilizados en nuestros días. La propuesta de Ducos suponía efectuar una separación de los colores por medio de filtros y superponer, después, sobre una misma placa los positivos correspondientes a los colores primarios. Más tarde, Ducos de Hauron llevó a la práctica precisamente ese método, exhibiendo las primeras preparaciones fotográficas plenamente conseguidas en tricromía –producto nuevamente de un proceso de adición de colores– en la Sociedad Fotográfica de París, en 1869. Fue un logro apenas matizado por el hecho de haber identificado erróneamente como colores primarios el rojo, amarillo y azul.

Ducos de Hauron había sugerido, en 1868, que el proceso basado en triple filtro y triple negativo podía eliminarse exponiendo una emulsión a través de una pantalla de finísimas líneas de los colores rojo, amarillo y azul trazadas sobre un cristal. Las líneas rojas sólo permitirían que llegase a la emulsión luz roja; de igual modo, las líneas azul y amarilla transmitirían tan sólo luz azul y amarilla, respectivamente. Si el positivo fuese recubierto, después, por una pantalla similar de idéntica gradación, las zonas expuestas del positivo reflejarían luz a través de las mismas líneas de color que habían creado la exposición. Las finas líneas de colores primarios se mezclarían en el ojo del observador y recrearían los colores originales.

Ducos de Hauron carecía de recursos económicos para llevar a la práctica su teoría. Sin embargo, a finales de siglo, empresarios irlandeses y es-



7. GRANOS DE ALMIDON DE PATATA, teñidos de tonos próximos a los tres colores primarios, desempañaban la misma función que los filtros de las cámaras concebidas por Ducos de Hauron e Ives. Los franceses Auguste y Louis Jean Lumière, inventores del cinematógrafo, se valieron de granos de almidón para el proceso Autochrome, que introdujeron en 1907. Antes de efectuar la exposición se embebía una capa sencilla de granos en la emulsión fotográfica; tras la exposición y el blanqueado, la luz transmitida a través de los granos recreaba los colores primarios que, al fundirse en el ojo, reproducían los distintos colores del tema fotografiado.



8. EL PROCEDIMIENTO TRIPACK y su sucesor, el Kodachrome **(abajo)**, *combinaban en una sola placa los tres negativos en color. El tripack, inventado por Ducos de Hauron en 1987, consistía en una placa de vidrio recubierta de bromuro de plata (sensible al azul en exposiciones cortas), seguida por un filtro amarillo (que sólo permite el paso de luz roja y de luz verde), una capa de emulsión sensible al verde, un filtro rojo y una emulsión final. La placa Kodachrome es casi idéntica; el filtro rojo no es necesario porque en la época de la introducción del sistema, en el decenio de 1930, existían ya emulsiones sensibles al rojo.*



9. CATASTROFE DEL HINDENBURG, en un reportaje fotográfico de 1937. La existencia de emulsiones capaces de registrar tres colores sobre un mismo negativo –legado del tripack– hicieron posibles las instantáneas en color.

tadounidenses la adoptaron. Sus sistemas padecieron mil tropiezos, que iban desde la dificultad de la gradación de los matices, pasando por el prohibitivo precio de las pantallas de líneas, hasta la pertinaz falta de sensibilidad de las emulsiones en el extremo rojo del espectro. Los franceses Auguste y Louis Jean Lumière, pioneros del cine, eludieron, en 1907, estos problemas con su proceso "Autochrome", que fue el primer procedimiento práctico de proceso en color y que era también un método aditivo.

Los hermanos Lumière sí tuvieron ayuda. Hacia 1907, habían aparecido emulsiones pancromáticas, que respondían más o menos por igual en ambos extremos del espectro, eliminando las dificultades debidas a la insensibilidad al rojo. Los Lumière procedieron, entonces, a eliminar los problemas de gradación y el costo desorbitado de las pantallas ideando un método alternativo, mucho más económico. Tiñeron granos de almidón de patata con los colores rojo-anaranjado, verde y violeta; combinaron, a continuación, la emulsión fotosensible y los gránulos de almidón sobre una placa transparente, formando una película de un grano de espesor. La luz que se filtraba a través de los granos de almidón impresionaba la emulsión, la cual, al ser blanqueada, transmitía la luz a través de los granos, reproduciendo así los colores a los que la emulsión había quedado expuesta. El proceso Autochrome y sus variantes permanecieron comercialmente viables hasta el decenio de 1930, época en que fueron desbancados por el proceso Kodachrome y otros precursores de los métodos substractivos hoy en boga.

Ducos de Hauron había iniciado los trabajos sobre reproducción sustractiva del color en 1874, reforzando la sensibilidad de las placas fotográficas roja y verde con tintes sensibilizadores. (Un perfeccionamiento que fue posible merced al descubrimiento, en 1873, de tintes ópticamente sensibilizadores, debidos al químico alemán Hermann W. Vogel.) Ducos logró reducir los tiempos de exposición de las placas roja y verde a tiempos iguales a los de las placas azules, despejando el camino hacia la exposición simultánea, en lugar de sucesiva.

Para sacar partido de tal avance, Ducos de Hauron inventó una cámara provista de tres lentes, capaz de impresionar simultáneamente tres placas en color. La visual de cada lente era, no obstante, levemente distinta; así, al reconstruir la imagen resultaba imposible hacer coincidir exactamente los tres registros. Diseñó, en consecuencia, una cámara provista de una única lente, en la cual el haz luminoso era escindido mediante espejos en tres que, tras pasar por filtros adecuados, impresionaban una placa cada uno [*véase la figura 5*].

La cámara de Ducos de Hauron exigía emulsiones más sensibles que las disponibles en el decenio de 1870. Hacia 1895, se habían conseguido emulsiones de mayor sensibilidad, lo que permitió a un inventor norteamericano, de nombre Frederic E. Ives, comenzar a comercializar un

aparato, llamado Kromskop, que funcionaba según los principios establecidos por Ducos de Hauron [*véase la figura 6*]. Era posible incluso adaptar la cámara para tomar negativos de separación que fueran estereoscópicos. Estos negativos estaban unidos mediante cintas para mantenerlos en la disposición correcta; podían ser observados mediante un visor, esencialmente idéntico a otro propuesto por Ducos de Hauron en 1869.

Lo único que faltaba para llevar la fotografía en color al siglo xx era un sistema para combinar los negativos de separación en una sola placa. En 1897, Ducos de Hauron ideó un sistema tal, al que denominó "tripack". Consistía en una placa de vidrio recubierta por una capa transparente de bromuro de plata (que es sensible al azul en exposiciones cortas), inmediata a un filtro amarillo (que permitía el paso de las luces verde y roja), una fina película de emulsión sensible al verde, un filtro rojo y, finalmente, una emulsión pancromática [*véase la figura 8*]. Ducos de Hauron hacía negativos a partir de los positivos; después, una impresión en amarillo a partir del negativo azul, una impresión magenta a partir de negativo verde, y una azul cian a partir del negativo rojo. Por combinación de las impresiones de estos colores complementarios, producía una reproducción a todo color. Las películas en color de nuestros días son variantes refinadas del "tripack" original de Ducos de Hauron.

He tocado tan sólo algunos de los puntos culminantes de la historia de la fotografía en color a lo largo del siglo pasado; hay todavía otras innovaciones, más amplias y elaboradas. De la panoplia de diversas técnicas, pocas se practican hoy todavía. Empero, de ser cierto que los aniversarios son fechas para el recuerdo, la historia de la fotografía en color mereció ser conmemorada en las celebraciones del año pasado. Hay en las técnicas fotográficas del ayer mucho digno de recordar, capaz posiblemente de contribuir todavía a la incesante evolución de la fotografía.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HISTORY OF PHOTOGRAPHY. Josef Maria Eder. Traducción de Edward Epstean. Columbia University Press, 1945.

HISTORY OF COLOR PHOTOGRAPHY. Joseph S. Friedman. Focal Press, 1968.

HISTORY OF THREE-COLOR PHOTOGRAPHY. E. J. Wall. Focal Press, 1970.

COLOUR PHOTOGRAPHY: THE FIRST HUNDRED YEARS 1840-1940. Brian Coe. Ash & Grant, 1978.

Microagregados

Grupos restringidos de átomos constituyen una fase diferente de la materia. Su química, altamente reactiva y selectiva a la vez, encuentra posibles aplicaciones en catálisis, óptica y electrónica

Michael A. Duncan y Dennis H. Rouvray

Cuando dividimos y subdividimos un sólido, sus propiedades van desapareciendo gradualmente, al igual que sucedía con los rasgos del gato de Cheshire, y se sustituyen por otras características diferentes de las que distinguen a los líquidos y gases. Estas características son propias de una nueva fase de la materia que recibe el nombre de microagregados.

Los microagregados consisten en pequeños conjuntos constituidos por un número restringido de átomos, desde algunas unidades a varios centenares. Estos cuerpos plantean cuestiones que se sitúan en el corazón mismo de la física y la química del estado sólido y del campo, relacionado, de la ciencia de los materiales: ¿cuán pequeño puede hacerse un agregado de partículas antes de que se pierdan las características de la sustancia de la que dichas partículas formaban parte originalmente? ¿Cómo se reestructuran los átomos constituyentes de una sustancia cuando se liberan de la influencia de la materia que los rodea? Si la sustancia en cuestión es un metal, ¿cuán pequeño debe ser un agregado de sus átomos para evitar la característica compartición de electrones libres que explica la conductividad? ¿Se produce el crecimiento de los agregados de forma gradual desde una estructura estable a otra, por simple adición de átomos, o por el contrario, dichas estructuras experimentan transformaciones radicales a medida que van creciendo?

Muchas de las propiedades de los agregados vienen determinadas por el hecho de que un agregado consista fundamentalmente en una superficie. Un agregado, fuertemente compacto, constituido por 20 átomos posee un átomo en su interior; un agregado formado por 100 átomos puede poseer sólo 20. Otras de sus propiedades tienen su origen en la capacidad de enlace electrónico que caracteriza a estos agregados, que los deja "desnudos" y, por tanto, extremadamente reactivos. Esta reactividad los convierte en herramientas muy eficaces para estudiar el estado sólido y, potencialmente, para procesos industriales tales como el crecimiento de cristales, la catálisis química selectiva y la creación de materiales totalmente nuevos, con propiedades electrónicas, magnéticas y ópticas "hechas a la medida". A su vez, estos materiales pueden mejorar el funcionamiento de productos tan diversos como los láseres, las películas fotográficas, los fósforos electrosensibles, los discos magnéticos y los superordenadores.

La importancia potencial de los agregados fue reconocida mucho antes que en el laboratorio. La primera referencia a los agregados fue, quizá, la realizada en 1661 por el químico inglés Robert Boyle, en su obra *El químico escéptico*, cuando habla de "masas diminutas de agregados (que) no eran fácilmente disipables en partículas tales como las que los forman". Debido a su tamaño microscópico y a su extrema reactividad química, estos agregados no se pudieron investigar con las técnicas de la química de superficies tradicional, ni sintetizar tampoco en el laboratorio, hasta la década de los cincuenta.

En estos primeros trabajos, se utilizó un horno para vaporizar un metal, que posteriormente se depositaba en forma de agregados sobre un sustrato. En un principio, se probaron metales alcalinos tales como el sodio o el potasio, a temperaturas de unos 1000 grados centígrados; más adelante se estudiaron otros metales con puntos de fusión y vaporización más elevados. Sin embargo, los metales con temperaturas de transición particularmente elevadas dan lugar a agregados constituidos sólo por tres a cinco átomos. Este hecho hace imposible determinar cuántos átomos se necesitan para que se presenten las propiedades carcterísticas de un sólido y se pierdan las que definen a los agregados.

Un procedimiento que suele ser más eficaz, en el que un metal sólido se vaporiza con ayuda de un láser, fue desarrollado, en 1981, por dos grupos independientes, uno dirigido por Richard E. Smalley, de la Universidad de Rice, y el otro por Vladimir E. Bondybey, de los laboratorios AT&T. En aquel entonces, uno de los autores (Duncan) trabajaba con Smalley preparando su tesis de doctorado. Fue, pues, uno de los primeros en observar la producción de agregados con láser. Esta técnica se ha mejorado considerablemente con el tiempo y ahora es capaz de producir agregados de hasta 100 o más átomos compuestos virtualmente de cualquier sustancia que exista como sólido. También se han preparado agregados de materiales compuestos.

El proceso se inicia haciendo llegar un haz pulsante fuertemente colimado de láser sobre una barra o disco metálico situado en un conducto, lo

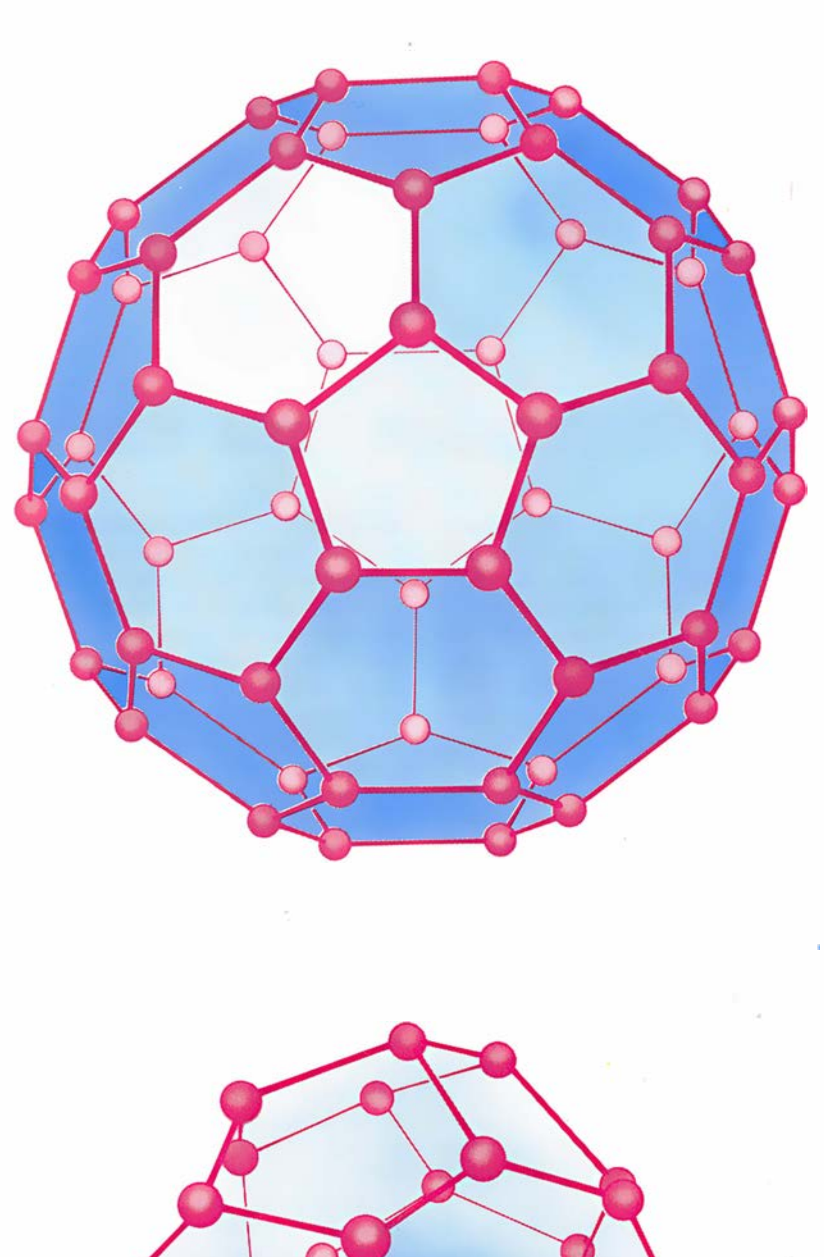
MICHAEL A. DUNCAN y DENNIS H. ROUVRAY trabajan en el departamento de química de la Universidad de Georgia. Duncan, que es allí profesor, participó en los ensayos iniciales, realizados en la Universidad de Rice, para producir agregados metálicos por vaporización con láser. En 1981 se doctoró en Rice y pasó luego a estudiar química de la atmósfera en el Instituto Conjunto para el Laboratorio de Astrofísica de Boulder, Colorado. La Universidad de Georgia lo contrató en 1983. Rouvray se graduó en el Colegio Imperial de Ciencia, Tecnología y Medicina de la Universidad de Londres. Hace 16 años, en la de Oxford, se interesó por el desarrollo de modelos matemáticos para la predicción del comportamiento químico. Es director editorial de la revista *Journal of Mathematical Chemistry*.

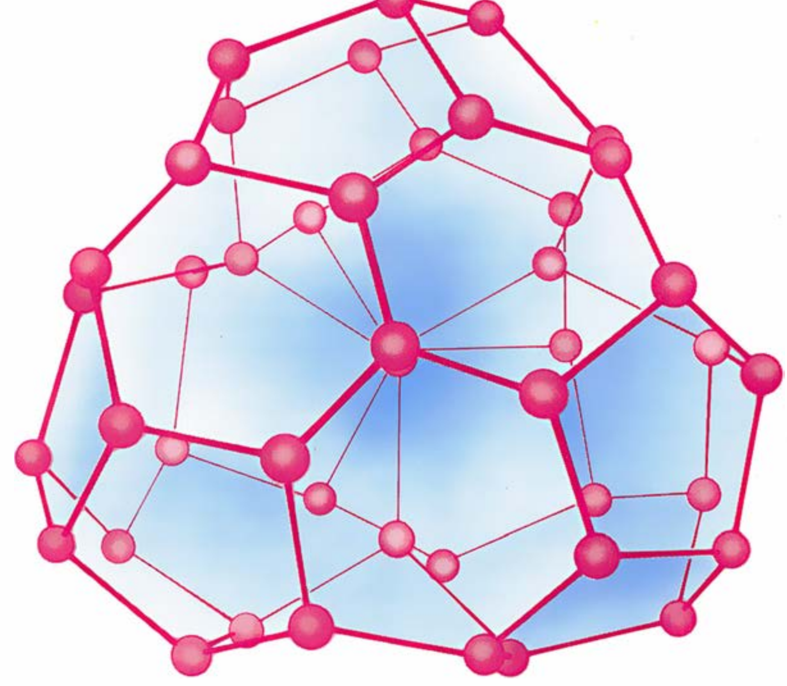
cual origina una evaporación de sus átomos y produce un plasma extremadamente caliente. Una ráfaga de gas helio, liberada con anterioridad en dicho conducto, enfría el vapor y produce su condensación, dando lugar a agregados de diferentes tamaños. La misma corriente barre a los agregados hasta el interior de una cámara de vacío, donde la diferencia de presión hace que el chorro que llega a ella se expansione supersónicamente. Las colisiones que ocurren durante esta expansión enfrían a los agregados hasta una temperatura próxima al cero absoluto, estabilizándolos para un estudio posterior.

El centro del chorro atraviesa un orificio practicado en la parte opuesta de la cámara. El haz resultante se irradia, a continuación, con un haz de láser ultravioleta, de energía suficiente para liberar electrones de los agregados. La extracción de estos electrones proporciona una carga positiva a los agregados, de suerte que puedan acelerarse en un campo eléctrico de intensidad conocida, a lo largo de una distancia también sabida. Este espectrómetro de tiempo de vuelo, así se llama el ingenio, produce la agrupación de los agregados en paquetes diferentes, de forma tal que las especies más pesadas (las formadas por la mayoría de los átomos) se sitúan en un extremo y las más ligeras en el otro.

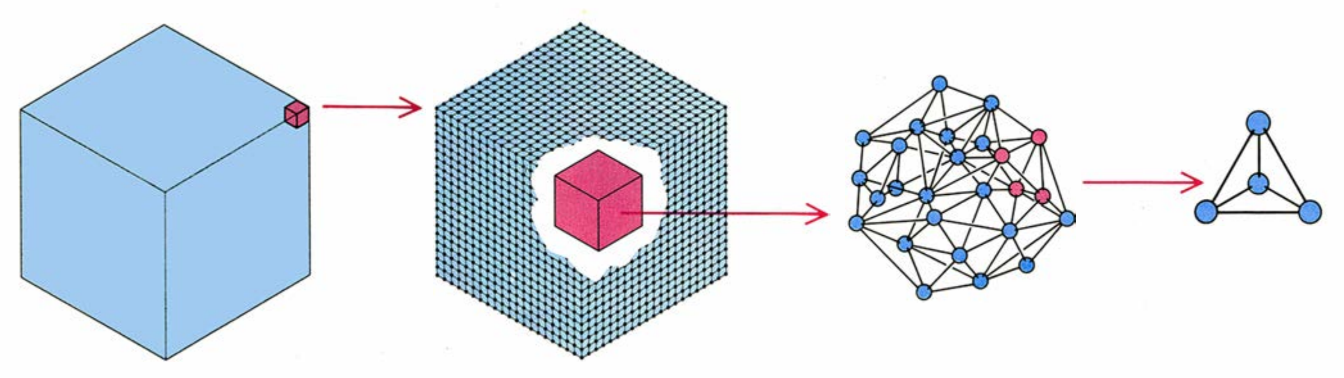
Los pormenores de la geometría de los agregados pueden estudiarse a partir de la distribución de los tamaños de los agregados. Se considera que los tamaños que aparecen con especial abundancia son los asociados con configuraciones muy estables. Esos tipos de agregados, que originan una figura con forma de espiga cuando se representa gráficamente el número de átomos, reciben el nombre de números mágicos (por analogía con el modelo cuántico de los núcleos atómicos, según el cual ciertas combinaciones de protones y neutrones están permitidas y otras no).

En ocasiones, los números mágicos podrían servir para predecir las geometrías de los agregados. Consideremos, por un momento, el espectro de masas del plomo, en el que los agregados constituidos por siete y diez átomos se presentan con una frecuencia doble que la de otros agregados o especies próximas. Se cree que cada una de estas dos formas posee una estructura que es precursora de las formas de empaquetamiento de átomos que se han observado en el plomo sólido. La formación constituida por 10 átomos es un elemento





1. ESTRUCTURAS PROPUESTAS para los agregados constituidos por 60 átomos de carbono (*arriba*) y 45 átomos de silicio (*abajo*); en teoría, deberían tener una gran estabilidad, pero su existencia todavía no se ha demostrado. La forma de balón de fútbol que se sugiere en el caso del carbono 60 es una estructura que se encuentra en las llamas hollinosas de los hidrocarburos y, tal vez, en el polvo interestelar. Esta estructura peculiar se denomina buckminsterfullereno, en memoria del inventor de la cúpula geodésica. La estructura con forma simétrica y protuberancias que se han propuesto recientemente para el silicio 45 podría derivar de los mismos tipos de elementos poligonales.



2. CONTRACCION DE LOS SOLIDOS hasta formar un agregado, sin pasar a través de un punto de transición definido. Diversas propiedades (punto de fusión, potencial de ionización y geometría) cambian en diferentes estadios, en su tránsito del estado sólido al estado de microagregado.

clave en la estructura reticular del diamante, en la que los enlaces químicos se comportan según una simetría de cuarto orden, para mantener a los átomos en posiciones fijas de una red relativamente abierta. Los agregados de siete átomos podrían crear bipirámides pentagonales, con cinco átomos en un plano y con el sexto y séptimo átomos situados encima y debajo de dicho plano, respectivamente. Estas dos configuraciones constituyen los bloques de construcción primarios de la estructura compacta cúbica, una disposición familiar que es la que se observa en el plomo sólido.

Las bipirámides pentagonales pueden aceptar fácilmente seis átomos más, para dar lugar a icosaedros, es decir, figuras casi esféricas que son las formas más estables de empaquetar de forma muy compacta a un agregado. Estas figuras difieren muy poco de las encontradas en los sólidos con estructuras compactas.

Otro ejemplo de cómo inferir estructuras de un agregado, conocidos los datos de los espectros de masas, nos lo ofrecen los agregados de plomo de 14 átomos, que aparecen con un tercio de la frecuencia de los tamaños de agregado. Este fenómeno se puede interpretar como una consecuencia de la estabilidad relativa que la teoría predice para los agregados icosaédricos constituidos por 13 átomos, una estabilidad que hace difícil que un conjunto formado por 14 átomos alcance la cohesión necesaria. Los átomos prefieren formar agregados con 13 átomos, dejando libre un átomo.

Los autores se interesaron en aplicar los números mágicos al estudio de los agregados constituidos por mezclas de metales que forman aleaciones en el estado sólido. En el curso de nuestras investigaciones en la Universidad de Georgia, descubrimos que los agregados de plomo mezclado con antimonio —ambos miembros del mismo grupo principal de metales— tenían proporciones elementales que diferían considerablemente de las encontradas en las aleaciones de este tipo. La existencia de dos máximos en los espectros de masas ponía de manifiesto la presencia desproporcionada de un ion con dos átomos de plomo y tres átomos de antimonio, y de otro ion con cuatro átomos de plomo y cinco de antimonio. Recordamos entonces que estas estructuras de enlace se habían observado antes en los iones de Zintl, una forma de moléculas estables cuya estructura era conocida gracias a la cristalografía de rayos X. Nuestros microagregados (y una familia de agregados de aleaciones en fase gaseosa relacionada con ellos, cuyas partículas constituyentes son, en realidad, moléculas mixtas de diferentes metales) parecían tener una estabilidad análoga a la de los iones de Zintl, lo que sugería que sus estructuras eran las mismas: cinco átomos dispuestos en forma de bipirámide trigonal (con 6 caras triangulares) o nueve átomos dispuestos en forma de un antiprisma cuadrado cubierto (con 12 caras triangulares y una cara cuadrada).

Quizá las más sorprendentes de todas, por su belleza matemática, sean las dos estructuras matemáticas propuestas para las especies de agregados constituidos por carbono y silicio, respectivamente. Aunque las estructuras originales de estos agregados presentan, teóricamente, la máxima estabilidad que cabe prever para estas especies, extraordinariamente inertes, no se ha aportado todavía una prueba concluyente de su existencia. La estructura de carbono está constituida por 60 átomos formando una red de hexágonos y pentágonos que se parece a un balón de fútbol. Smalley llamó a esta estructura peculiar "buckminsterfullereno" en honor del inventor de la cúpula geodésica; sugirió que el polvo interestelar cuya absorción de radiación da lugar al vacío que se observa en el espectro de la radiación ultravioleta podría tener dicha estructura. En fecha reciente, Smalley ha propuesto una forma todavía más compleja, también con caras de tipo hexagonal y pentagonal, para los agregados constituidos por 45 átomos de silicio.

Podría parecer natural asignar cierta protosolidez a los pequeños agregados de un material que se convertiría en sólido de haber cantidad suficiente para ello. En realidad, esta asignación parece ser válida para los metales cuya estructura de empaquetamiento de agregados es muy parecida a la que presenta el material como un todo. Pero, en otros casos, esta presunción trasciende lo que la observación respalda.

Vemos un contraejemplo de ello en los agregados que forman isómeros, es decir, configuraciones moleculares diferentes de un mismo compuesto químico. Cada isómero es estable localmente, debido a que su creación ahorra energía, pero puede desplazarse a otra forma isomérica diferente si se proporciona una cantidad suficiente de energía de calentamiento. Botón de muestra de esos agregados fluctuantes es el trímero de sodio: los tres átomos que lo constituyen forman un triángulo isósceles cuyo único ángulo salta continuamente de un vértice a otro, incluso a temperaturas muy próximas al cero absoluto. Dado que su forma no se mantiene constante a nivel microscópico, estos agregados fluctuantes deberían considerarse en realidad gotitas de líquido, no partículas sólidas, en el supuesto de que estas denominaciones tengan sentido a dicho nivel.

La geometría de los agregados se puede estudiar también a partir de otros tipos de datos. Por ejemplo, las configuraciones electrónicas ejercen un influjo directo sobre la frecuencia con que se presentan los diferentes tamaños de agregados, dado que las estructuras electrónicas de enlace de-

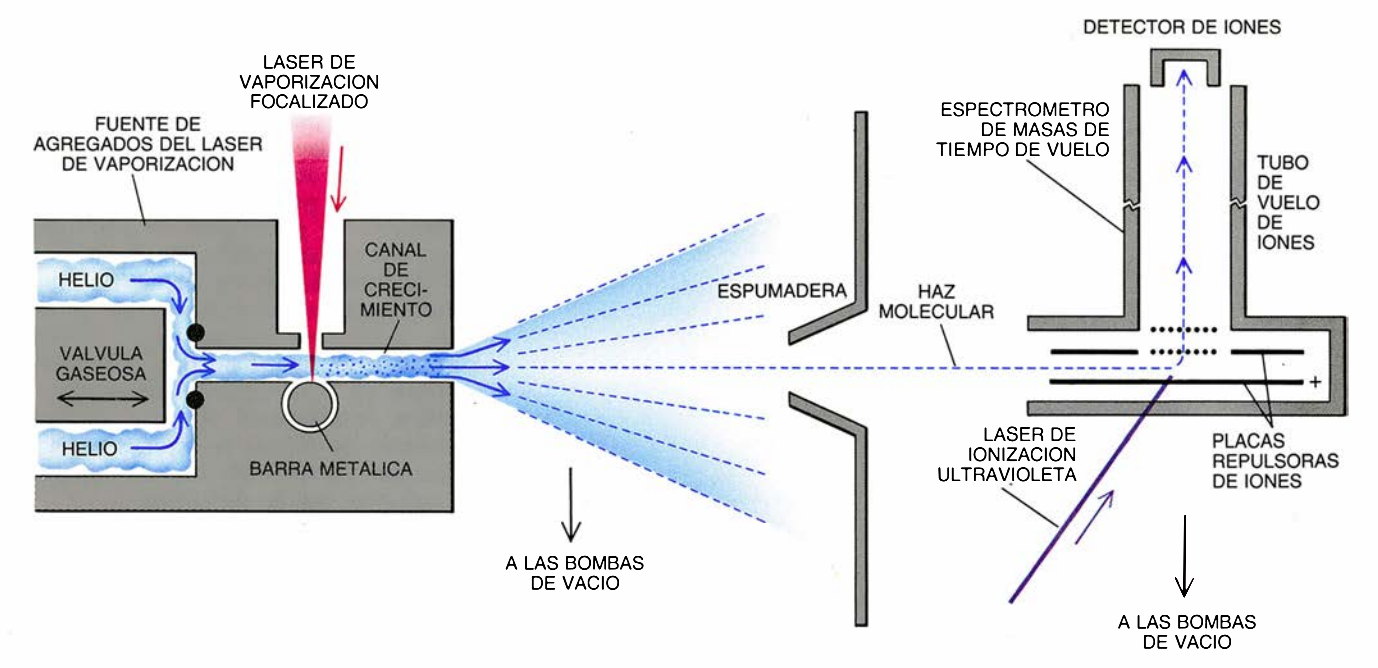
terminan que ciertos agregados sean particularmente estables. Dichas configuraciones dependen de los orbitales de los que proceden los electrones y del grado de libertad de que disfrutan tales electrones. Cuando los electrones son compartidos por todo el agregado en una forma no localizada, de suerte tal que la densidad de carga negativa no sea mayor en un punto que en otro, el agregado podría mostrar ciertas características de metal sólido, tales como la conductividad. Cuando los electrones se presentan fuertemente ligados a los átomos, los agregados se parecen más a moléculas discretas.

Los electrones deslocalizados se encuentran en los agregados de metales alcalinos (sodio y potasio) y en metales de acuñación (cobre y plata). En ambos casos, los átomos metálicos poseen un único electrón en el orbital *s* que está disperso, o compartido, entre todos los átomos que forman el agregado. A medida que el número de átomos que constituyen dicho agregado aumenta, los orbitales atómicos se combinan para dar lugar a orbitales moleculares que contienen todos los electrones presentes en el agregado; en tal caso, los orbitales moleculares originan, de manera gradual, ciertas "bandas" o estados energéticos similares a los que se observan en los sólidos. Estos metales muestran máximos de frecuencia de agregados para tamaños que se corresponden con los predichos por un modelo cuántico para un cuerpo de forma esférica con electrones compartidos. Estas predicciones se parecen mucho a los números mágicos que se infieren del modelo cuántico de los núcleos atómicos, y son similares, en algunos aspectos, a las capas de electrones que se calculan para el átomo de hidrógeno.

Como Walter D. Knight, Marvin L. Cohen y sus colaboradores de la Universidad de California en Berkeley han descubierto, los picos de abundancia coinciden con los agregados de sodio de 8, 20, 40, 58 y 92 átomos. Estas cifras constituyen una prueba vigorosa a favor de la idea según la cual los electrones de estos sistemas de agregados están deslocalizados de la misma forma general que los electrones en los correspondientes sólidos. Sin embargo, deberíamos advertir que el modelo cuántico que predice estos picos de abundancia no puede hacerse extensivo al estado sólido, que, a diferencia de los agregados, no puede considerarse un sistema con simetría esférica.

Los enlaces parecen estar más localizados en los agregados de los metales del grupo principal; el plomo y el antimonio, entre ellos. En estos casos, los electrones más externos ocupan los orbitales *p*, que son más compactos desde el punto de vista espacial. Dado que únicamente los electrones *p* participan en el proceso de enlace, dichos enlaces poseen un carácter más local que el que se observa en el caso de los metales alcalinos y de acuñación. Estos metales del grupo principal tienden a ser menos reactivos, lo cual explica por qué dichos metales forman, algunas veces, agregados desnudos cuando se disuelven en líquidos, tal como sucede con los iones de Zintl. La particular estabilidad de estos últimos débese a que sus capas de electrones se hallan completas; por tanto, se demuestra que los enlaces *p* predominan en estos sistemas electrónicos, tanto en fase gaseosa como en fase condensada. Se cree también que los enlaces *d* intervienen en los metales de transición (hierro, cromo o níquel), pero es mucho más difícil someter estos metales a un modelo.

Se puede sacar más información sobre la configuración electrónica de los agregados determinando la cantidad de energía necesaria para extraer un electrón de uno de ellos. En el caso de las moléculas, esta energía recibe el nombre de potencial de ionización; en los sólidos, el de función de trabajo. Los átomos solitarios retienen a sus electrones más fuertemente de lo que lo hacen los agregados de átomos con los electrones compartidos; por esta razón, el valor de los potenciales de ionización de la mayoría de los metales suele ser el doble que el de sus funciones de trabajo. Si los agregados se comportaran como pedazos de un sólido, la teoría prediría una relación suave e inversa



3. GENERADOR DE AGREGADOS: utiliza un láser pulsante para vaporizar metal en un canal barrido por una corriente de gas helio, que enfría el vapor de forma tal que condensa creando agregados de diferentes tamaños. Los agregados pasan a una cámara de vacío, donde se expanden muy rápidamente y se enfrían hasta temperaturas próximas al cero absoluto. A continuación, los agregados se ionizan con un láser ultravioleta, se aceleran con un campo eléctrico, a lo largo de una distancia conocida, produciéndose su agrupación en diferentes paquetes o picos de abundancia, de acuerdo con sus masas. Los picos mayores corresponden a estructuras dotadas de particular estabilidad. (Esquemas realizados por Hank Iken.)

entre el tamaño de dichos agregados y la energía de enlace de los electrones, que, en el límite, tendería al valor de la función de trabajo.

Andrew Kaldor y sus colaboradores, de la Compañía de Investigación e Ingeniería Exxon, determinaron los potenciales de ionización de los agregados de hierro y niobio. Procedieron a irradiar agregados con un láser ultravioleta de frecuencia variable, empezando con una frecuencia de baja energía y aumentando lentamente el valor de dicha energía, hasta que en su espectrómetro detectaron la presencia de los primeros agregados cargados. A partir de aquí, continuaron aumentando la frecuencia del láser y, al mismo tiempo, representaron la distribución de las masas de los agregados. Así, encontraron que, conforme crecía el tamaño de los agregados, disminuía el potencial de ionización. Sin embargo, la curva de variación correspondiente no era suave; algunos agregados se comportaban más como moléculas, que como trozos de un sólido. Estos resultados, junto con los establecidos por otros investigadores con metales distintos, demuestran que, en agregados constituidos hasta por 100 átomos, el valor del potencial de ionización no tiende al de la función de trabajo. Claramente, la transición de la fase de agregados a la fase de estado sólido se produce en agregados de mayor tamaño.

Se cree también que otras propiedades de los sólidos sólo se presentan en los agregados cuando éstos crecen, aunque los puntos de transición entre unos y otros se han encontrado muy raramente. Agregados de oro depositados en un sustrato adecuado sólo alcanzan la temperatura de fusión del oro sólido cuando contienen mil o más átomos, aunque en este caso no está nada claro hasta qué punto el sustrato influye sobre dicha temperatura de fusión.

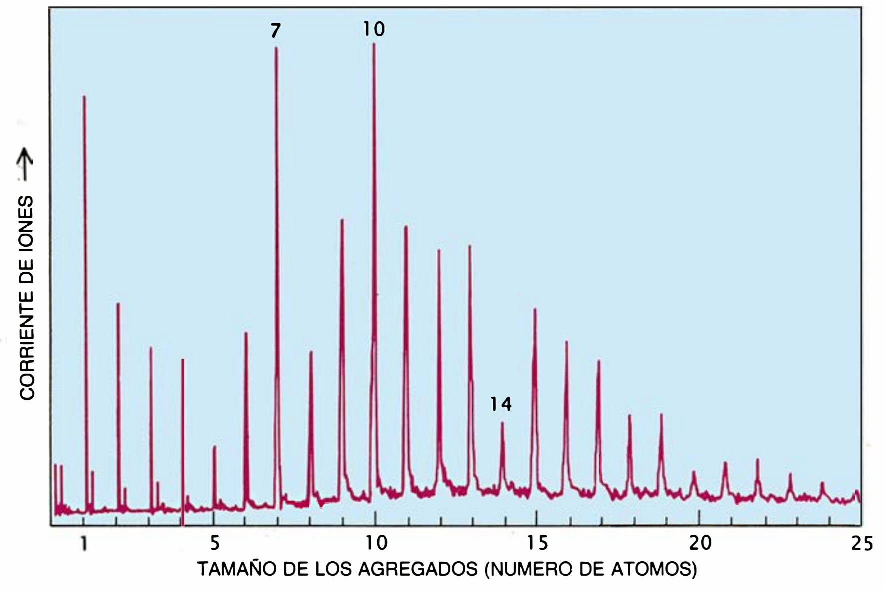
Mediante análisis con rayos X, se ha descubierto que el espaciado atómico medio es, en los agregados de cobre constituidos por dos átomos, significativamente menor que en el metal sólido, con un valor que tiende al del sólido sólo en agregados que posean más de 50 átomos. Sin embargo, a pesar de esta diferencia sustancial, los agregados tan pequeños como los constituidos por 14 átomos de cobre muestran ya la estructura cúbica compacta que caracteriza al sólido. Las energías orbitales de los agregados de cobre, aluminio y silicio (calculada a partir de las energías para las que los electrones se liberan después de recibir una radiación de frecuencia conocida) no tienden a la estructura del sólido, ni siquiera en el caso de agregados del tamaño de los constituidos por 40 átomos. Agregados mayores no se han estudiado por este método, debido, en parte, a la dificultad de generar haces que contengan un gran número de ellos.

De todos estos estudios se desprende la conclusión según la cual las diferentes características físicas de los agregados convergen con las de los sólidos para escalas diferentes. Los sólidos no surgen en su plenitud de forma brusca, sino que, al igual que sucedía con el gato de Cheshire, van emergiendo poco a poco, y la sonrisa es lo que aparece en primer lugar.

¿Cómo podríamos aprovecharnos de la química de superficie de los agregados? Algunas de las aplicaciones más prometedoras están relacionadas con la catálisis industrial, una operación fundamental en el proceso de refinado de petróleo (con el fin de recuperar las fracciones de gasolina procedentes de los destilados más densos), en el control de la polución (para oxidar o reducir las emisiones nocivas) y en la síntesis de productos farmacéuticos. La catálisis comienza cuando la superficie de un catalizador adsorbe, por ejemplo, moléculas de monóxido de carbono o de óxido de nitrógeno. Estas moléculas se acumulan en ciertas "zonas activas", en las que los enlaces se rompen y se recomponen para formar, en dichos ejemplos, nitrógeno y dióxido de carbono. Las moléculas así constituidas se desadsorben a continuación y el catalizador queda disponible para repetir dicho proceso. La eficacia de un catalizador depende de su capacidad para atraer los reaccionantes con una fuerza suficiente para que se produzca su adsorción y, al mismo tiempo, los productos formados estén unidos a él con una debilidad suficiente como para que se produzca su desadsorción [véase "Catalizadores bimetálicos", por John H. Sinfelt; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1985] . Las zonas activas son un factor crítico de todo el proceso; la geometría de estas zonas sigue siendo uno de los misterios intrigantes que rodean a la mayoría de las reacciones catalíticas.

Los agregados son laboratorios ideales para el estudio de estas zonas activas; se debe ello a que su capacidad de enlace determina que su capacidad de adsorción sea muy elevada y a que su pequeño tamaño limita el número de geometrías de adsorción posibles. Esta restricción convierte a dichos materiales en fuentes de catalizadores muy específicos, que hacen lo que se pretende que hagan, y nada más. Esta especificidad es muy apreciada en la industria, dado que muchos catalizadores aceleran la ocurrencia de ciertas reacciones no deseadas con tanta eficacia como la que muestran con las deseadas.

Los primeros estudios de catálisis con agregados se acometieron, a principios de los años ochenta, por los grupos de Smalley y Kaldor y por un tercer grupo bajo la dirección de Stephen J. Riley, del Laboratorio Nacional de Argonne. Desde entonces, la catálisis de los agregados ha sido objeto de investigación en la Universidad de California en Los



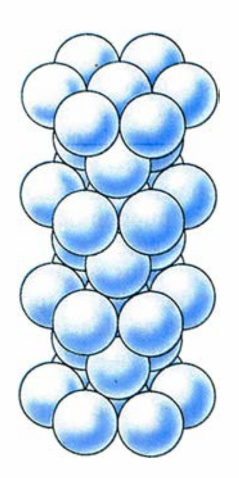
4. ESPECTRO DE MASAS DE AGREGADOS DE PLOMO. Nos muestra la presencia de dos picos destacados, correspondientes a 7 y 10 átomos, y de un pico deficitario para 14 átomos. Estos valores se denominan números mágicos, lo mismo que en el modelo cuántico de los núcleos atómicos.

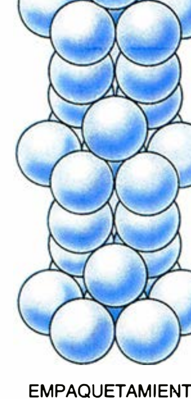
Angeles, en la de Utah y en otras instituciones.

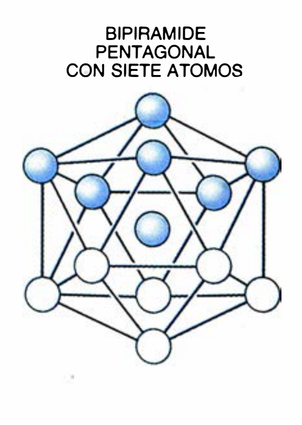
La búsqueda de un catalizador hecho a la medida se inició probando una serie de sistemas sencillos, en los que se comprobó la eficacia de los agregados de hierro, cobalto, niobio o aluminio en su calidad de adsorbentes de gas hidrógeno. En muchos casos, se encontró que ciertos tamaños de agregados eran inmensamente más eficaces que otros. Por ejemplo, los agregados de hierro constituidos por 10 átomos adsorben hidrógeno mil veces más deprisa que los agregados formados por 17 átomos. El grupo de Kaldor demostró que las velocidades de adsorción estaban correlacionadas con valores bajos de los potenciales de ionización, lo cual condujo a la hipótesis de que los electrones más débilmente ligados intervenían en la adsorción. Más tarde se descubrió que los agregados de niobio, por ejemplo, adsorbían el hidrógeno con la misma eficiencia cuando estaban ionizados que cuando eran neutros. En otras palabras, estos agregados funcionaban con los electrones más externos lo mismo que sin ellos, lo cual sugería que su catálisis dependía de la forma de estas estructuras, y no sólo de sus enlaces.

El descubrimiento de que pequeños cambios en el tamaño de los agregados puede originar grandes diferencias en el comportamiento adsorbente de los mismos refuerza la idea de que los agregados constituyen una fase diferente de la materia. Este hecho sugiere, también, la posibilidad de seleccionar, por su tamaño, agregados adsorbentes específicos, y depositarlos sobre un sustrato para su uso en catálisis industrial, en tanto que los agregados no reactivos podrían depositarse, de manera selectiva, sobre dichos sustratos para formar revestimientos protectores.

Esta propiedad representaría un gran avance en dicho campo, dado que la mayoría de los catalizadores industriales son todavía producto de la "magia negra". Ahora, por primera vez, la utilización de los agregados permite descubrir los secretos de los catalizadores. La microscopía de efecto túnel, nueva técnica que capacita a los investigadores para tomar instantáneas de los átomos individuales en una reacción, puede desempeñar un papel importante en el estudio de la interacción entre los agregados y el sustrato sobre el que están depositados. La migración, el proceso mediante el cual los agregados se unen a los sustratos y, más tarde, se recomponen, es un fenómeno que podría salir a la luz con esa técnica.







5. ESTRUCTURAS COMPACTAS de los sólidos. Pueden ser hexagonales (*izquierda*) o cúbicas (*centro*). Podrían guiar el crecimiento de los agregados y obtener agregados como la bipirámide pentagonal de siete átomos (*color, derecha*) y la estructura icosaédrica con 13 átomos basada en ella.

Ernst Schumacher, de la Universidad de Berna, ha abordado el problema de la interacción entre agregados y sustratos de forma diferente. Este autor ha procedido a encerrar agregados de metal alcalino en el interior de unas moléculas huecas de gran tamaño, conocidas con el nombre de jaulas de zeolita. Estas moléculas impiden que los agregados en cuestión participen en ciertas reacciones no deseadas, sin atentar contra su capacidad de catalizar la polimerización del etileno para dar lugar a polietileno [véase "Zeolitas sintéticas", por George T. Kerr; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1989]. Es muy posible que la extensión de este trabajo a los agregados de los metales de transición permita fabricar catalizadores de zeolitas con características muy especiales.

Los nuevos avances en la catálisis con agregados dependerán de nuestro conocimiento sistemático de estas sustancias. En primer lugar, los estudios realizados al efecto deben correlacionar los metales particulares y los tamaños de las partículas individuales con las actividades químicas específicas. El paso siguiente consistirá en seleccionar los agregados más adecuados y depositarlos sobre los sustratos pertinentes, tal vez dispuestos en pilas, formando redes tridimensionales muy precisas, capaces de soportar moléculas en crecimiento, como sucede con las enzimas. Si estas iniciativas se ven coronadas por el éxito, la técnica podría contribuir de modo importante al avance de la síntesis química.

La utilización de capas delgadas de agregados que posean las adecuadas cualidades electrónicas sería de gran interés en microelectrónica. Aunque este campo se encuentra también en un estado embrionario, se pueden prever ya muchas aplicaciones en memorias ópticas, procesamiento de imágenes y superconductividad. La posibilidad de construir partes de circuitos con agregados facultaría la fabricación de dispositivos electrónicos a escala molecular. En última instancia, se podría diseñar una máquina dotada de capacidad para servir de puente entre los sistemas electrónicos de estado sólido y sistemas biológicos tales como los sistemas de neuronas. Un dispositivo de estas características podría facilitar la transferencia de los datos registrados por una cámara de televisión al cerebro de una persona ciega.

El primer paso en esta dirección consiste en formar capas de agregados de semiconductores con un espesor del orden de 100 angstrom. Esta técnica se basa en el empleo de haces moleculares y se ha aplicado ya a la creación de redes cristalinas de alta precisión, en una técnica denominada epitaxia de haces moleculares. Si se encontrara la forma de utilizar agregados, en vez de átomos, para formar dichas redes, se podrían crear estructuras mucho más complejas que las actuales. El problema consiste en lanzar los agregados contra un sustrato, con fuerza suficiente para enlazarlos entre sí, sin llegar a destruirlos. El grupo de Isao Yamada, del laboratorio de haces iónicos de la Universidad de Kyoto, ha llevado a cabo este proceso con agregados de varios materiales, tales como aluminio, sobre diferentes clases de sustratos, silicio entre ellos. Las películas obtenidas presentan un espesor uniforme y poseen un alto poder reflec-



tante óptico, amén de una gran resistencia a la oxidación.

El trabajo llevado a cabo recientemente en el laboratorio de los autores pone de manifiesto que las mezclas de metales tales como el hierro y el bismuto, que no pueden formar aleación a escala macroscópica, pueden dar lugar a agregados en fase gaseosa. Si se lograra que estos agregados se depositaran en forma de películas, se podría crear un nuevo tipo de aleaciones con propiedades híbridas valiosas.

Se está haciendo un gran esfuerzo para depositar agregados en capas delgadas capaces de funcionar como superconductores. Nosotros hemos preparado agregados de óxidos de cobre, itrio y bario que podrían formar dichas películas, investigación que se encuentra en una fase preliminar; las propiedades más valiosas de estas películas no se pueden todavía explotar comercialmente por la imposibilidad de producir en cantidades apreciables estos agregados de tamaño seleccionado.

Los agregados de ciertos metales poseen una alta capacidad de absorber luz. Esta propiedad se debe a la alta densidad de sus electrones de valencia, a su elevada relación entre superficie y volumen (en virtud de la cual existe un gran número de electrones próximos a su superficie) y a la facilidad con que sus nubes electrónicas se pueden distorsionar o polarizar. Sobre la base de una determinada química y tamaño de un agregado, se puede predecir qué longitudes de luz absorberá ese material. Knight y su grupo han establecido recientemente estas longitudes de onda características para los metales alcalinos. Dado que los agregados son muy buenos fotorreceptores, pueden absorber, con frecuencia, más de un fotón; esta cualidad resulta muy útil en los procesos químicos originados por la luz. Cuando se suspenden en un medio transparente, estos cuerpos pueden convertirse también en excelentes detectores de radiación, en filtros ópticos para longitudes de onda específicas o en elementos de un sistema de memoria óptica.

Andando el tiempo, cabría la posibilidad de explotar las propiedades químicas y ópticas de los agregados para crear una nueva clase de películas fotográficas con virtudes singulares. Cuando estas películas se exponen a la luz y un fotón incide sobre un pequeño cristal de haluro de plata, convierte parte del mismo en un agregado de plata metálica. Este agregado actúa de catalizador en el proceso de revelado, convirtiendo al resto del cristal en plata metálica. Si se lograra crear agregados de alta sensibilidad —formados quizá por metales diferentes— podrían fabricarse películas mucho más rápidas que las actuales. Pequeñas formaciones de agregados adecuados permitirían producir películas capaces de proporcionar imágenes con una resolución más elevada.

La gran reactividad y las propiedades fotoemisivas de los agregados son también de gran valor desde el punto de vista de su utilización como combustible químico para los láseres. James L. Gole, del Instituto de Tecnología de Georgia, ha demostrado que los agregados de sodio triatómico reaccionan con el cloro para producir sodio diatómico excitado, en cantidad suficiente para crear una inversión de poblaciones, a partir de la cual el proceso de emisión estimulada proporciona un haz de luz coherente en la región azul-verde del espectro visible. Este color se transmite fácilmente a través del agua y, por tanto, un haz de láser que utilizara este combustible podría convertirse en un nuevo medio de comunicaciones submarinas.

A lo largo de esta última década, los investigadores de agregados han desarrollado una ciencia interdisciplinaria y han puesto sobre la mesa toda una serie de cuestiones relacionadas con la naturaleza de las superficies moleculares. Aunque la química de esta nueva fase de la materia se encuentra todavía en su infancia, el conocimiento que se tiene actualmente de la misma nos permite intuir su potencial interés en campos tan diversos como la ciencia de los materiales, la electrónica y la astrofísica.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

METAL CLUSTERS. Dirigido por Martin Moskovits. John Wiley & Sons, Inc., 1986.

ATOMIC CLUSTER: LINK BETWEEN ATOMS, SURFACES AND SOLIDS. Frank Träger y Gisbert F. zu Putlitz en *Interdisciplinary Science Reviews*, vol. 11, n.° 2, págs. 170-175; 1986.

CHEMICAL BONDING, KINETICS, AND THE APPROACH TO EQUILIBRIUM STRUCTURES OF SIMPLE METALLIC, MOLECULAR AND NETWORK MICROCLUSTERS. J. C. Phillips en *Chemical Reviews*, vol. 86, n.° 3, págs. 619-634; junio de 1986.

THEORETICAL ASPECTS OF METAL ATOM CLUSTERS. Jaroslav Koutecký y Piercarlo Fantucci en *Chemical Reviews*, vol. 86, n.° 3, págs. 539-587; junio de 1986.

CLUSTERS OF TRANSITION-METAL ATOMS. Michael D. Morse en *Chemical Reviews*, vol. 86, n.° 6, págs. 1049-1109; diciembre de 1986.



Las aves del paraíso

La dieta ejerce un poderoso influjo en el comportamiento social y sexual de estas aves tropicales. Así se explica que algunas especies sean monógamas y otras promiscuas

Bruce M. Beehler

Las aves del paraíso, habitantes de un reino tropical muy alejado de los museos y laboratorios del mundo occidental, han sido foco de la curiosidad científica durante muchos años. En 1871 Charles Darwin, en su libro *El origen del hombre y la selección en relación al sexo*, se refirió a ellas con estas palabras: "cuando contemplamos un ave macho exhibiendo de manera tan refinada sus plumas elegantes de espléndidos colores ante la hembra... resulta imposible dudar que ésta admira la hermosura de su pareja masculina".

Aunque han pasado casi 120 años desde que Darwin llamara la atención sobre el plumaje de los machos de las aves del paraíso, la evolución de plumas especializadas y otros aspectos de su comportamiento reproductor continúan interesando a los biólogos. Durante los 10 últimos años, una nueva generación de investigadores, armados con nuevas ideas procedentes de la sociobiología y de la ecología del comportamiento, han averiguado mucho sobre la organización social de las aves del paraíso.

Thane K. Pratt, del Servicio de Pesca y Vida Salvaje de los Estados Unidos en Hawai, Clifford B. y Dawn W. Frith, de Conservación Internacional de la Vida Salvaje, Stephen G. y Melinda Pruett-Jones, de la Universidad de Chicago, y el autor de este artículo han invertido, sumadas todas sus horas, más de una década en el campo, estudiando la vida de estas aves. Miles de horas de observación sobre el terreno han demostrado que la diversidad de comportamientos sociales y sexuales en esta notable familia aviar tiene una base ecológica.

1. MACHO DE AVE DEL PARAISO de Raggi exhibiéndose ante una hembra (que no aparece en la fotografía, aunque está muy cerca): se inclina hacia delante, con la cabeza hacia abajo, y extiende las alas y las plumas anaranjadas de los flancos. El macho de esta especie se posa en su rama cada día durante al menos seis meses al año.

Además, hoy día se sabe que estas aves, que se alimentan sobre todo de frutos, desempeñan un papel clave en el mantenimiento y regeneración de la pluviselva papú.

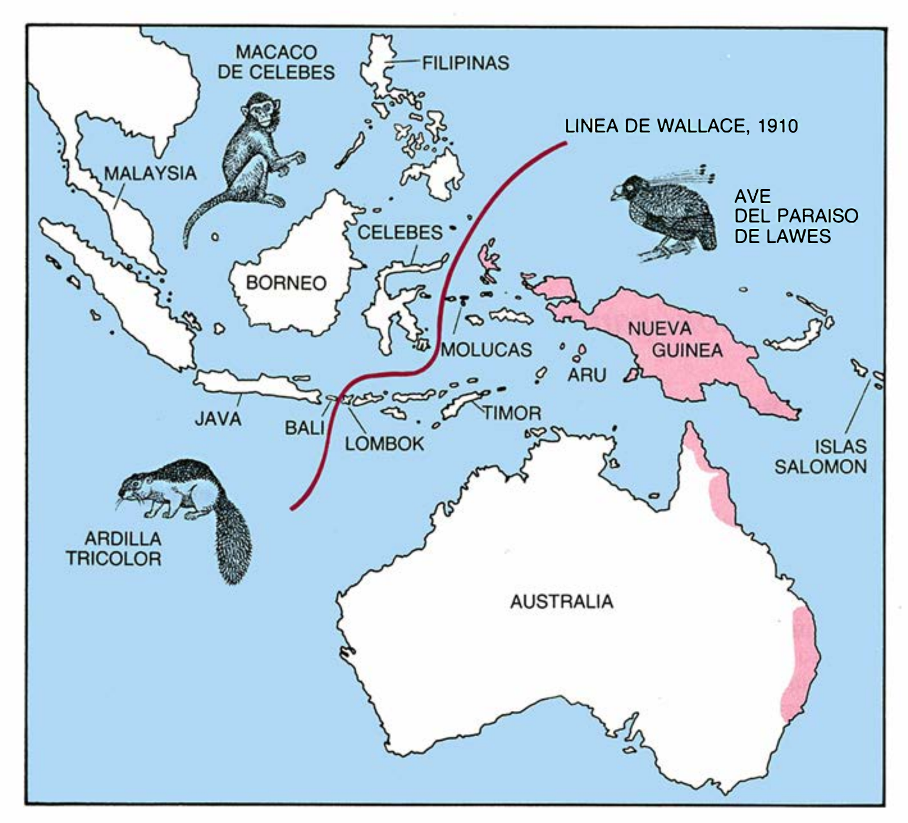
Mi investigación sobre las aves del paraíso comenzó en 1975, con una estancia de 15 meses en Papúa Nueva Guinea. Aunque ya han pasado 14 años desde que puse por vez primera el pie en la isla, una de mis iniciales correrías por la selva ha quedado vivamente grabada en mi mente. Abriéndome paso a través de una lujuriante maraña de vegetación tropical en el valle del Watut superior, en Nueva Guinea oriental, llegué hasta un árbol alto en el que había ocho machos adultos del ave del paraíso de Raggi, hermosos especímenes con la testa amarilla, la garganta verde iridiscente y el pecho pardo aterciopelado. Mostraban sus largas plumas anaranjadas al tiempo que se inclinaban y se exhibían ante una hembra visitante, que se hallaba posada en una rama a menos de quince centímetros de un macho situado en el centro del grupo. Para mí el color, movimiento y sonido de la exhibición del apareamiento fue, y continúa siendo, uno de los espectáculos más emocionantes de la naturaleza.

Hay 42 especies en la familia Paradiseidos. De ellas, 36 son endémicas de Nueva Guinea y de sus islas satélite, cuatro se hallan en Australia oriental y dos se encuentran mucho más al oeste, en las islas Molucas septentrionales, de Indonesia. La familia incluye varias aves que difieren en su aspecto externo: aves del paraíso de pico falciforme, parotias, astrapias de largas colas, aves del paraíso de denso plumaje y manucodias de color azul obscuro. Todas son de constitución robusta, con patas y pies potentes, pero de una especie a otra hay gran variación en color y plumaje. En la mayoría de las especies las aves son sexualmente dimórficas, es decir, machos y hembras difieren de forma considerable en cuanto a su aspecto: los machos suelen ser de colores ostentosos y poseen plumas largas y ornamentadas, llamadas plumas nupciales, mientras que las hembras carecen de estas plumas especializadas y su color predominante es siempre pardo o negro.

Los colores vivos y las exhibiciones de cortejo de los machos de aves del paraíso son testimonio del poder de la selección sexual, el proceso por el que algunos individuos ganan (y otros pierden) el derecho a reproducirse. La competencia entre los miembros de un sexo (por lo general el masculino) para acceder al otro sexo (por lo general el femenino) explica las notorias diferencias entre machos y hembras, muy comunes en el reino animal; por ejemplo, el plumaje rojo vivo del cardenal macho frente al pardo apagado de la hembra o las grandes astas del ciervo ante la cabeza mocha de la cierva.

En la actualidad, buena parte del debate sobre la selección sexual se centra en la naturaleza de las interacciones entre machos, así como de las que se dan entre machos y hembras. ¿Por qué es tan potente el dimorfismo sexual en algunas especies de aves del

BRUCE M. BEEHLER es zoólogo del Museo Nacional de Historia Natural, de la Institución Smithsoniana. Desde su juventud mostró un vivo interés por las aves. Durante su último curso de carrera en el Williams College obtuvo una beca Thomas J. Watson, que le permitió realizar su primera expedición ornitológica a Nueva Guinea. Se trasladó luego a la Universidad de Princeton, donde realizó su tesis sobre la ecología de comportamiento de las aves del paraíso. En conjunto, Beehler ha pasado unos sesenta meses en las pluviselvas de Nueva Guinea, estudiando la ecología de la fauna aviar de la isla. En la actualidad estudia la ecología y la biogeografía de la avifauna de la India, en colaboración con S. Dillon Ripley, secretario emérito de la Smithsoniana.



2. AVES DEL PARAISO, endémicas de las pluviselvas de Australia, Nueva Guinea y las islas Molucas de Indonesia. En ciertos aspectos, las aves ocupan el nicho ecológico que en otras partes corresponde a los mamíferos arborícolas frugívoros. La ausencia de los mamíferos puede atribuirse a la existencia de una barrera de aguas profundas que separa las islas del Sudeste asiático de Australia y Nueva Guinea. Dicha barrera, identificada por Alfred Russel Wallace en 1863 y redefinida por él mismo en 1910, se denomina Línea de Wallace. Al este de la barrera hay aves del paraíso; al oeste, animales placentarios, como las ardillas tricolor y los macacos, que se alimentan de frutos.

paraíso y apenas se advierte en otras? ¿Representan, las plumas vistosas de los machos, distintivos de dominancia dentro de una jerarquía de apareamiento, o bien informan a la hembra sobre la salud física y el vigor de su portador? Si se trata de esto último, ¿hay alguna prueba de que las hembras escogen a sus machos guiadas por las características físicas? Aunque todavía no podemos responder exhaustivamente a estas preguntas, hemos ya avanzado mucho en el conocimiento de las bases ecológicas del comportamiento en las aves del paraíso. Pero antes de entrar en materia y hablar de los éxitos recientes es preciso recordar la organización social de los Paradiseidos.

No todas las aves del paraíso presentan dimorfismo sexual. Nueve de las 42 especies de la familia son monomórficas; es decir, machos y hembras tienen un aspecto casi idéntico. Las especies monomórficas, como la manucodia trompetera, *Manucodia keraudrenii*, son, además, monógamas: la pareja se une mediante lazos estrechos, que quizá duran toda la vida. Asimismo, ambos sexos cooperan en la cría de los jóvenes. Por el contrario, las especies dimórficas, como el ave del paraíso de Raggi, *Paradisaea raggiana*, son poligínicas: los machos son promiscuos y en una sola estación se aparean con todas las hembras que pueden. Después de la cópula, las hembras no reciben ninguna ayuda adicional de los machos y crían solas a sus polluelos.

¿Por qué han evolucionado en el seno de una misma familia estrategias de apareamiento tan distintas? ¿Por qué, en particular, unas especies son poligínicas y otras monógamas? La respuesta tiene dos partes. La primera guarda relación con la influencia de la anisogamia, la desigualdad de las células sexuales masculinas y femeninas, sobre la poliginia; la segunda (como explicaré más adelante) tiene que ver con el comportamiento de obtención de alimento de una especie y con el impacto nutritivo y económico de la dieta en las estrategias reproductoras.

A diferencia de los óvulos, los espermatozoides son minúsculos y de producción barata desde el punto de vista energético; de ahí que, en muchas especies, los machos pueden maximizar su rendimiento reproductor (es decir, el número de genes que transmiten a la siguiente generación) apareándose con tantas hembras como sea posible. Las hembras, en cambio, producen sólo unos cuantos óvulos; se hallan, pues, limitadas en su rendimiento reproductor. El resultado es una dicotomía morfológica y de comportamiento entre los sexos: los machos tienden a la promiscuidad y la competencia (a veces feroz) para acceder a las hembras, mientras que éstas tienden a ser selectivas, favoreciendo a los machos dotados de ciertos caracteres.

Así, en una población monógama, en la que hay poca competencia porque los individuos establecen lazos duraderos con su pareja, encontramos escaso dimorfismo sexual. En una población poligínica, donde la competencia es intensa, la evolución tiende al dimorfismo porque los machos con el plumaje más brillante y las exhibiciones más refinadas se aparean con más hembras, con lo que transmiten más de sus genes y rasgos a la siguiente generación. Para un macho que está compitiendo con sus vecinos, una diferencia mínima (un canto más fuerte, un comportamiento más agresivo o plumas más llamativas) puede decidir entre ninguna cópula y múltiples cópulas.

Tanto en las poblaciones monógamas como en las poligínicas, las hembras suelen mostrar colores apagados. Puesto que siempre están solicitadas por los machos, no necesitan ser vistosas para reproducirse. Se cree que, en ausencia de valor reproductivo alguno para la coloración vistosa, la selección natural favorece a las hembras de aspecto deslustrado frente a las de colores vivos: una hembra críptica o camuflada que cuida del nido tiene menos probabilidad de atraer a los depredadores que buscan huevos o polluelos.

Los machos del ave del paraíso de Raggi, como los que vi exhibiéndose juntos en 1975, son, en muchos aspectos, característicos de las especies sexualmente dimórficas y poligínicas. Su ritual de cortejo es complicado y, puesto que lo realizan simultáneamente varios machos cuando se encuentran juntos, resulta también competitivo. Un grupo de machos que cortejan, el llamado lek, se reúne cada mañana al amanecer en un árbol de exhibición. Advierten su presencia a las hembras que se hallen al alcance del oído, con fuertes gritos: *uau*, *uau*, *uau*, *Uau*, *Uau*, *Uau*, *UAU*, *UAU*, *UAU*, *UAU*, con volumen y velocidad crecientes. Si una hembra acude, en respuesta, al árbol de exhibición, los machos inician una danza de cortejo: levantan sus plumas anaranjadas

de exhibición, agitan sus alas y saltan de un lado a otro, mientras continúan con su reclamo.

Después de una breve tanda de ruidoso comportamiento de exhibición, los machos se vuelven silenciosos y quedan colgados de sus posaderos cabeza abajo, con las alas dirigidas hacia delante y las plumas anaranjadas enhiestas, formando un surtidor coloreado y refulgente. El grupo mantiene esta postura hasta que la hembra, que se mueve silenciosamente entre los machos, escoge a su pareja y se agazapa a su lado. Los otros machos observan pasivamente cómo el macho elegido realiza una danza precopulatoria y luego monta a la hembra y se aparea con ella. Esta se separa de su pareja poco después y se va volando hasta su nido, donde uno o dos días después pondrá un huevo.

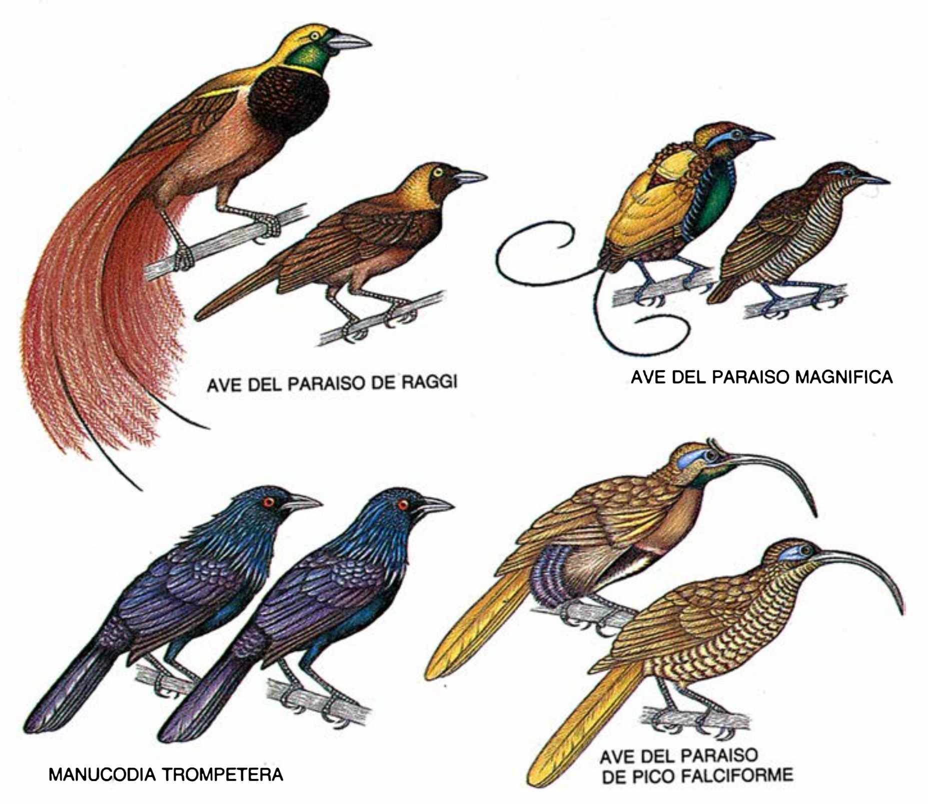
Los machos de las demás especies poligínicas se comportan de forma similar, pero cada especie tiene su propio ritual de cortejo, que es realzado por el color y plumaje distintivos del macho. Por ejemplo, el macho de una de las aves del paraíso de pico falciforme, *Epimachus albertisi*, se exhibe colgándose cabeza abajo y extendiendo sus plumas para formar un manto circular. El ave del paraíso magnífica, *Cicinnurus magnificus*, forma un escudo de plumas que parece una gorguera alta y baila como un juguete mecánico, con las plumas caudales enhiestas, mientras se cuelga de una rama vertical. La parotia o ave del paraíso de Lawes, *Parotia lawesii*, se exhibe en el suelo del bosque de una forma sorprendente: mientras la hembra observa desde arriba, el macho extiende hacia delante sus seis rígidas plumas cefálicas, como si se tratara de antenas, expande sus plumas hasta que forman una falda y salta delicadamente a uno y otro lado.

En algunas especies poligínicas, como el ave del paraíso de Raggi, los machos forman grupos de apareamiento, o leks, en los que se congregan y se exhiben ante las hembras visitantes. El tipo de lek varía de una especie a otra. Las aves del paraíso de Raggi, por ejemplo, tienden a congregarse en un árbol, mientras que los machos del ave del paraíso de Lawes forman un lek expandido: en vez de amontonarse, de modo que cada macho se encuentre a escasos metros de su vecino, se sitúan separados unos de otros de una docena a un centenar de metros o más, pero siguen actuando como miembros de un único grupo de apareamiento. En algunas especies, como el ave del paraíso magnífica, los machos son solitarios y no forman ningún lek.

La presencia o ausencia de leks plantea preguntas adicionales sobre la evolución de las estrategias de apareamiento en los Paradiseidos. En la mayoría de leks, uno o dos machos dominantes, por lo general los que están posados en la vecindad del centro del grupo, se aparean con más frecuencia. Sólo en contadas ocasiones los machos periféricos tienen una oportunidad de aparearse. Por ejemplo, en un lek del ave del paraíso menor, *Paradisaea minor*, registré que un único macho realizó 25 de las 26 cópulas observadas durante un mes de la época de apareamiento. ¿Por qué razón, si la competencia entre machos es tan feroz, se congregan de manera tan estrecha? ¿Acaso las probabilidades de apareamiento de un macho no serían superiores fuera de un lek? ¿Y por qué algunas especies forman leks y otras no? Las respuestas a las preguntas indican que la formación de un lek, lo mismo que la poliginia, se relaciona con la ecología de forrajeo u obtención de alimento de una determinada especie.

Un primer indicio de que la poliginia podría guardar relación con la dieta llegó a raíz de las investigaciones que, en la década de 1970, realizaron David y Barbara Snow, del Museo Británico de Historia Natural. Sus estudios se centraron en la relación entre la organización del apareamiento y la especialización alimentaria en dos familias de aves: las cotingas (Cotíngidos) y los saltarines (Pípridos), ambas endémicas de las pluviselvas de Centroamérica y Sudamérica. Aunque cotingas y saltarines están sólo lejanamente emparentados con las aves del paraíso, muestran pautas de dimorfismo sexual y de comportamiento de apareamiento notablemente parecidas.

Los Snow encontraron que la mayoría de las especies poligínicas eran frugívoras, mientras que la mayoría de las especies monógamas eran total o predominantemente insectívoras. También demostraron que buscar insectos requería más tiempo y energía que buscar frutos; y razonaron que sólo comiendo frutos los machos poligínicos tendrían tiempo suficiente para dedicarse a sus promiscuas estrategias de apareamiento. ¿Existiría una pauta similar, me pregunté, para las aves del paraíso?



3. DIFERENCIACION FISICA entre machos y hembras (conocida como dimorfismo sexual), representada aquí por cuatro especies. El dimorfismo sexual es más pronunciado en el ave del paraíso de Raggi (*arriba, izquierda*): los machos, mayores que las hembras, están adornados con plumas anaranjadas en los flancos, que resultan muy vistosas cuando el macho se exhibe. La hembra del ave del paraíso de Raggi, lo mismo que todas las hembras de los Paradiseidos, es de colores apagados. El macho y la hembra del ave del paraíso magnífica (*arriba, derecha*) alcanzan una talla similar, pero aquél posee brillantes colores y dos plumas insólitas, los alambres caudales, que hace fulgurar cuando corteja. Machos y hembras del ave del paraíso de pico falciforme (*abajo, derecha*) tienen picos largos y curvados, que emplean para extraer insectos de la madera y frutos de sus cápsulas. Los machos y las hembras de la manucodia trompetera (*abajo, izquierda*) son monomórficos.

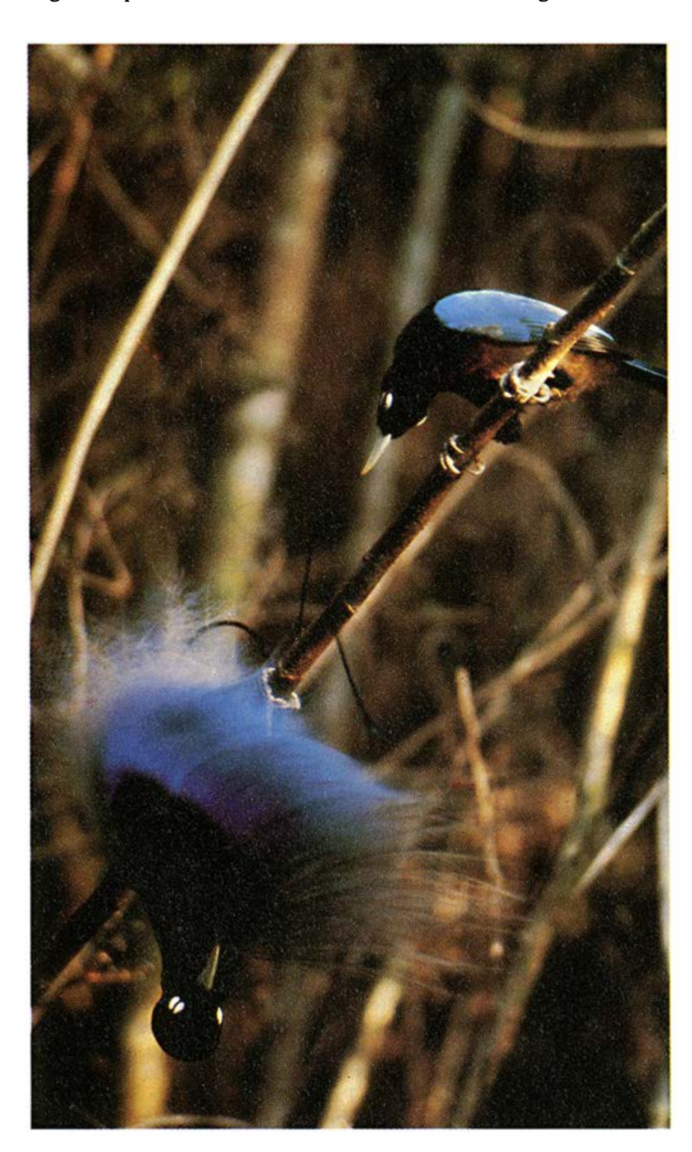
Resultó ser que la correlación entre dieta y comportamiento de cópula es bastante más compleja en los Paradiseidos que en las cotingas y los saltarines y, en todo caso, la pauta que los Snow observaron se halla invertida. Las investigaciones que hemos realizado con mis colegas demuestran que la especialización alimentaria ha tenido una influencia significativa en la evolución de los Paradiseidos, al promover la diversidad específica en la familia al mismo tiempo que ha fomentado el paso a un comportamiento de apareamiento poligínico.

Observé que los frutos que comen las aves del paraíso pueden subdividirse en dos categorías distintas: frutos sencillos, carnosos, como los higos, que son muy abundantes en la selva y suponen una fuente directa de agua y carbohidratos; y frutos complejos, como las nueces moscadas, que son grandes, por lo general protegidos por una envoltura externa dura y que son producidos en cantidades relativamente pequeñas. Estos frutos capsulares suelen ser ricos en grasas o proteínas y, por tanto, valiosos para las aves.

Pratt y yo encontramos que todas las aves del paraíso y casi todas las demás aves de la pluviselva comían grandes cantidades de higos cuando éstos alcanzaban su maduración. Puesto que la mayoría de higueras producen miles de pequeños frutos, que maduran rápidamente, en ciclos que no son anuales y sí asincrónicos, los higos se hallan disponibles en períodos impredecibles durante todo el año. Cuando una planta fructifica, la respuesta aviar es espectacular: manucodias, palomas frugívoras, papagayos higueros, melífagos y aves del paraíso acuden en bandada a la planta, atracándose de sus frutos.

Pero sólo una especie de ave del paraíso, la manucodia trompetera, monógama, se alimenta casi exclusivamente de higos. Aunque la mayoría de otras especies de aves del paraíso comen higos de forma oportunista, las especies poligínicas pasan la mayor parte de su tiempo de forrajeo buscando frutos complejos, generalmente de tipo capsular. Estos frutos maduran en pequeño número durante un largo período de fructificación, y son comidos por las aves que visitan diariamente los distintos árboles que van madurando. Los frutos capsulares son más difíciles de recolectar que los higos porque se hallan encerrados en una envoltura leñosa dura y constan de una sola semilla (rodeada de su porción comestible), que debe tragarse entera.

Resulta que la capacidad de determinadas especies de acceder al fruto capsular, difícil de alcanzar y no más fácil de abrir, está relacionada con su capacidad de alimentarse de insectos. Las aves forrajean en el





4. RITUALES DE APAREAMIENTO de las aves del paraíso; se trata de amoríos muy complejos que varían de una especie a otra. El macho del ave del paraíso azul (*izquierda*) se cuelga cabeza abajo, ondeando sus plumas ante una hembra que observa desde arriba. El macho del ave del paraíso de Raggi (*derecha*), terminada la fase de posición invertida de su exhibición, se prepara para aparearse con la hembra receptiva que está encima.

tronco y las ramas de los árboles, golpeando y separando la corteza y la madera muerta para extraer escarabajos de la corteza y otros insectos que carcomen o barrenan la madera, de manera muy parecida a como lo hacen los picamaderos. También se alimentan de insectos que se esconden en el interior de hojas abarquilladas, sosteniendo las hojas con las patas y extrayendo los insectos con el pico. Las adaptaciones anatómicas, como un pico largo y garras bien desarrolladas, que les permiten este insectivorismo especializado también posibilitan que las aves se alimenten de frutos capsulares.

Pocas veces se ven las aves que comen higos forrajeando en los árboles que producen frutos capsulares. Muchas plantas que portan estos frutos son visitadas de forma predominante o exclusiva por las aves del paraíso poligínicas. ¿Cómo acaeció una asociación tan exclusiva? La respuesta tiene que ver, en parte, con un giro biogeográfico del destino.

Monos y ardillas (y, en realidad, la mayoría de mamíferos placentarios) han sido incapaces de atravesar una barrera de aguas profundas denominada Línea de Wallace, que separa Australia y Nueva Guinea de las islas de plataforma del Sudeste asiático. En los hábitats tropicales al oeste de dicha línea, monos y ardillas recogen y consumen casi todos los frutos, incluso los capsulares, de parte comestible bien protegida. En muchos casos, las plantas no obtienen ningún beneficio de esta expoliación: a diferencia de las aves del paraíso, los mamíferos suelen destruir o consumir las semillas en vez de dispersarlas. En Nueva Guinea existen pocos mamíferos que consuman semillas, con lo que las aves del paraíso encuentran poca competencia por los frutos capsulares, muy nutritivos.

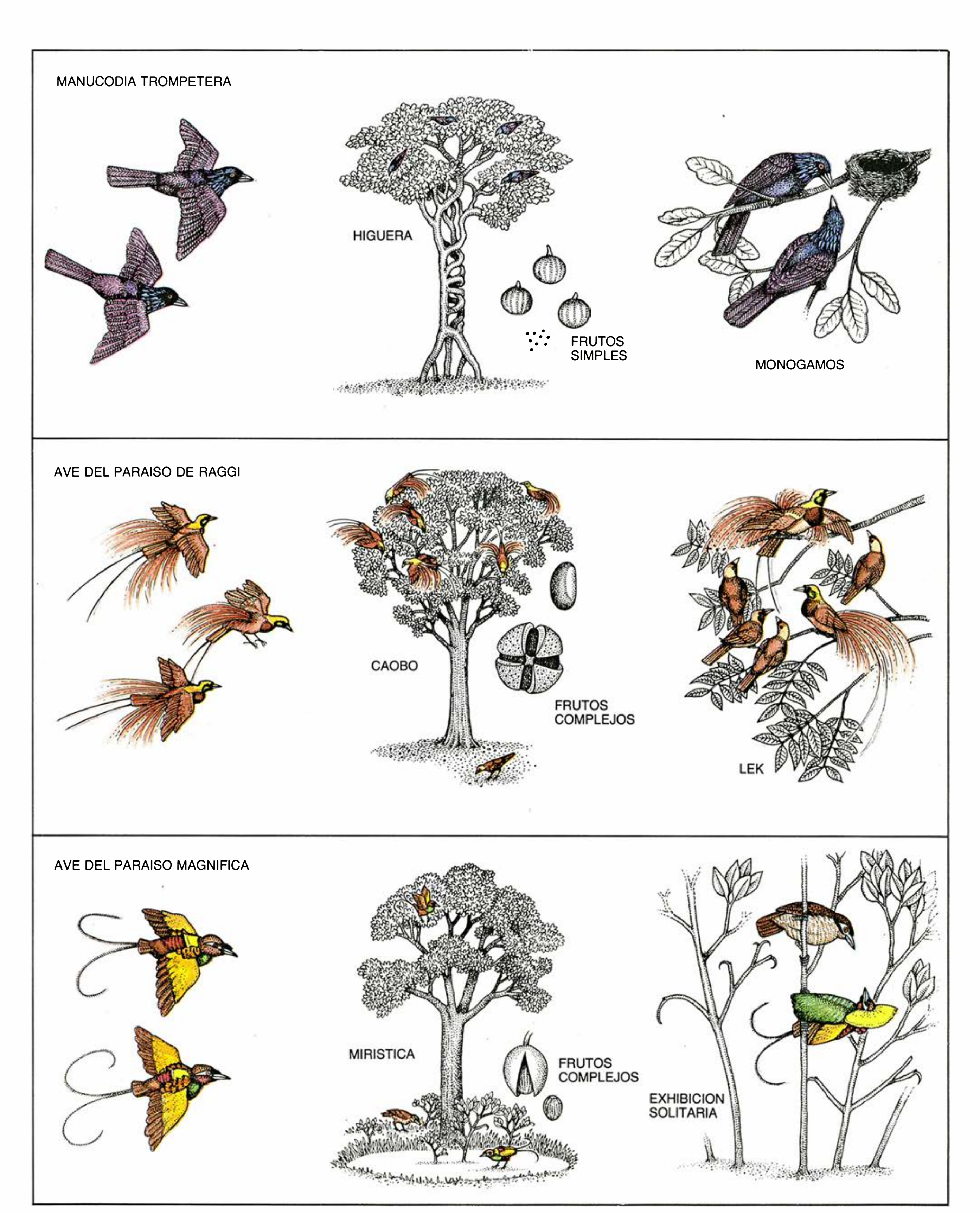
Pero la historia no se acaba aquí. Pratt y yo hemos observado que los paradiseidos poligínicos se cuentan entre los mejores dispersadores aviares de semillas de la selva tropical. Las aves recolectan poca cantidad de frutos en cada comida y sólo digieren la cubierta nutritiva de la semilla, no la propia semilla. Además, durante el período diario de búsqueda de comida, las aves vuelan tenazmente de un árbol a otro; al desplazarse, esparcen las semillas por toda la selva y no las depositan agrupadas, como suelen hacer otros animales frugívoros. Al tener frutos complejos bien protegidos, inaccesibles a la mayoría de los animales, la planta se asegura de que sus semillas estén en manos de expertos dispersadores, a los que recompensa ofreciéndoles sus frutos.



5. HEMBRA DE PAROTIA DE LAWES, posada en una rama; observa al macho que se exhibe en el suelo. El macho ha ahuecado las plumas de los flancos, formando una falda. Después de bailar se acercará a la hembra e intentará aparearse con ella. Los machos del ave del paraíso de Lawes forman leks expandidos: se exhiben conjuntamente, aunque separados, a cierta distancia, uno de otro.

Compárense las estrategias de obtención de alimento de la manucodia trompetera, monógama, con las del ave del paraíso magnífica, poligínica. La manucodia trompetera es un especialista: no está particularmente versada en la búsqueda y captura de insectos; se alimenta, sobre todo, de higos. A pesar de las ventajas (los higos abundan por doquier y son fáciles de colectar y de digerir), esa dieta no está exenta de contratiempos: los higos maduran en épocas impredecibles (con lo que las aves deben estar continuamente buscándolos) y son, asimismo, pobres en nutrientes esenciales para el crecimiento y el desarrollo. En consecuencia, el macho tiene que ayudar a la hembra en la búsqueda de comida para alimentar a sus pollos.

El ave del paraíso magnífica es también un especialista por cuanto se alimenta, sobre todo, de frutos complejos, pero el determinante clave de su comportamiento social es la proporción relativa de insectos que complementa su dieta. La ventaja de alimentarse de una dieta mixta de frutos complejos e insectos reside en que ambos son predecibles, tanto espacial como temporalmente, con lo que aseguran al ave del paraíso magnífica su manutención a lo largo de todo el año. Y lo que es más importante, dicha dieta es suficientemente alta en



6. LA ORGANIZACION SOCIAL en las aves del paraíso está influenciada por la ecología alimentaria de la especie. La manucodia trompetera (*arriba*) es, a la vez, monomórfica y monógama: machos y hembras forman lazos estables y cooperan en la cría de los jóvenes. Se alimentan, sobre todo, de higos. Los dos progenitores suministran a sus pollos una dieta de pulpa de higo. El ave del paraíso de Raggi (*centro*) es dimórfica y poligínica. Los machos cortejan activamente a las hembras y luego se aparean con las que sean receptivas; la pareja no establece lazos estables y las hembras crían solas a sus crías. Las aves del paraíso de Raggi comen principalmente frutos complejos, como los del caobo. Los machos forman grupos de apareamiento llamados leks, con la intención de atraer a las hembras que forrajean por la selva. El ave del paraíso magnífica (*abajo*), asimismo dimórfica y poligínica, se alimenta, como la de Raggi, de frutos complejos, la nuez moscada entre ellos. Pero los machos de esta especie poseen comportamientos solitarios; cada uno establece un terreno de exhibición en medio de la maleza, que incluye un área circular que se despeja de hojas. El macho canta desde su soto y, si una hembra lo visita, se exhibe ante ella desde una rama o desde una liana. (Dibujos de Patricia J. Wynne.)

nutrientes para que una hembra pueda alimentar a sus crías sin la ayuda de su pareja. De modo que los machos de ave del paraíso magnífica pueden invertir libremente su tiempo en mantener lugares de exhibición, que abandonan sólo periódicamente para obtener una ración diaria de alimento.

Nuestros estudios nos permitieron concluir que el tránsito de la monogamia a la poliginia se ha producido en las especies cuya dieta incluye frutos complejos junto a algunos insectos y frutos sencillos. En especies que se alimentan de manera casi exclusiva de higos, como la manucodia trompetera, el paso a la poliginia no ha tenido lugar, por la razón probable de que machos y hembras deben subvenir a las necesidades del nido.

¿Qué revelan estos hallazgos sobre la formación de leks en las aves del paraíso? ¿Por qué razón el ave del paraíso de Raggi, por ejemplo, se exhibe en atestados leks, mientras que los machos del ave del paraíso magnífica y de la de pico falciforme se exhiben en solitario? Jack W. Bradbury, de la Universidad de California en San Diego, ha propuesto que la evolución del comportamiento de lek está relacionada con la disponibilidad de hembras, que a su vez viene determinada por el comportamiento de forrajeo y, en último término, por la dieta. En su opinión, los leks se forman cuando las hembras van a buscar el alimento lejos y en un área extensa; y establecen, además, áreas de distribución que se superponen. En estas circunstancias, los machos que se exhiben en un lek tienen la posibilidad de atraer a muchas hembras no territoriales y de amplia distribución.

La teoría de Bradbury se ajusta bien a nuestros datos. Las hembras de especies tan bien estudiadas como el ave del paraíso de Raggi y la de Lawes tienen grandes áreas de distribución que se superponen. Un único lek puede recibir la visita de muchas hembras; por consiguiente, en estas especies el potencial para la poliginia es alto. En otras especies, como el ave del paraíso magnífica o la de pico falciforme, las hembras no se dispersan tanto y, en cambio, forrajean en retazos de bosque relativamente pequeños y no superpuestos. No resulta, pues, probable que coincidan en un lugar de exhibición, lo que explica el bajo potencial para la poliginia de estas especies.

Puede concluirse, de todo ello, que la poliginia y la formación de leks vienen instadas por tres factores. Primero, la distribución agregada de los frutos crea condiciones en las que los machos situados en un solo punto tienen probabilidades de entrar en contacto con muchas hembras. En segundo lugar, la predictibilidad y el contenido nutritivo de los frutos complejos posibilita que las hembras aprovisionen a sus pollos sin la ayuda de una pareja, y que los machos se pasen a una estrategia de apareamientos promiscuos. Tercero, una mayor dependencia dietética de los frutos promueve áreas de distribución más extensas en las hembras, y en los machos la formación de grupos de lek. Las aves del paraíso de Raggi y de Lawes, por ejemplo, se alimentan, de manera casi exclusiva, de frutos complejos (raramente insectos) y forman leks, mientras que el ave del paraíso magnífica y la de pico falciforme suelen comer insectos y son solitarias.



7. MACHO DE LA PAROTIA DE LAWES, que diverge de la hembra. Los vibrantes colores del pecho y los "alambres cefálicos" (plumas modificadas) de la parte posterior de la cabeza son caracteres sexuales secundarios que en esta y en otras especies dimórficas de aves del paraíso pueden haber evolucionado en respuesta a la competencia entre los machos por el acceso a las hembras.

Estudiar la evolución del comportamiento de apareamiento en los Paradiseidos desde una perspectiva ecológica nos ha conducido a una nueva comprensión de la dieta como determinante de la organización social. Ahora es evidente que las aves y las plantas de que se alimentan se muestran interdependientes. Además, sabemos ya que sólo conociendo la relación de las aves de esta notable familia con su hábitat de la pluviselva podemos entender sus diversas estrategias reproductoras.

Pero quedan todavía muchas cuestiones pendientes. Por ejemplo, las generalizaciones sobre la dieta y el comportamiento, ¿seguirán siendo válidas para las aves del paraíso aún por estudiar? ¿Qué criterio siguen las hembras para escoger entre los machos de un lek? ¿Por qué algunas especies poseen leks laxos, mientras que en otras los machos se amontonan? Y, finalmente, ¿por qué los machos mantienen la formación de leks, a pesar de la fuerte competencia que comportan? Estos y otros interrogantes sociobiológicos continuarán atrayendo la atención de los biólogos durante muchos años.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BIRDS OF PARADISE AND BOWER BIRDS. E. Thomas Gilliard. Natural History Press, 1969.

DISPLAY DISPERSION AND DIET OF BIRDS OF PARADISE: A COMPARISON OF NINE SPECIES. Bruce Beehler y Stephen G. Pruett-Jones en *Behavioral Ecology and Sociobiology*, vol. 13, parte 3, págs. 229-238; septiembre de 1983.

HOW LONG FRUIT-EATING BIRDS STAY IN THE PLANTS WHERE THEY FEED: IMPLICATIONS FOR SEED DISPERSAL. Thane K. Pratt y Edmund W. Stilesen *American Naturalist*, vol. 122, n.° 6, págs. 797-805; diciembre de 1983.

BIOLOGY OF BIRDS OF PARADISE AND BOWERBIRDS. Jared Diamond en *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 17, págs. 17-27; 1986.

BIRDS OF PARADISE AND MATING SYSTEM THEORY—PREDICTIONS AND OBSERVATIONS. Bruce M. Beehler en *Emu*, vol. 78, n.° 2, págs. 78-89; junio de 1987.

Teleoperadores

Ante la falta de robots completamente autónomos, se pueden realizar trabajos en ambientes hostiles o lejanos utilizando máquinas que estén manejadas a distancia por una persona

William R. Uttal

¿Cómo realizar un trabajo dentro de los límites de seguridad en un ambiente hostil, por ejemplo, en un recinto nuclear en funcionamiento, en el frente de batalla o en las profundidades de los océanos? Una estrategia, hasta ahora teórica, consiste en confiar en un robot autónomo. Otra, que ya se ha incorporado en algunos dispositivos, se apoya en los teleoperadores: máquinas manejadas a distancia por una persona. Estos dispositivos pueden enfocar la percepción, el juicio y la destreza de un trabajador humano hacia una tarea determinada, mientras permite que una persona controle el teleoperador desde una posición adecuada y segura.

Se halle el emplazamiento lejano de trabajo en una habitación contigua o en un planeta remoto, la idea básica de un teleoperador consiste simplemente en proporcionar un "alcance" mayor para el trabajador de lo que puede proporcionar una herramienta común. El teleoperador no es un robot en sentido estricto, porque lo controlan una inteligencia, una percepción y unas habilidades motoras humanas, en vez de la unidad central de proceso de un ordenador. Por tanto, la teleoperación, o el proceso de transmisión de la información relacionada con un trabajo hacia y desde un emplazamiento lejano, es fundamentalmente un problema de comunicación en doble sentido. El operario humano debe observar continuamente el emplazamiento lejano de trabajo, mientras envía señales de control a las herramientas que están trabajando allí.

WILLIAM R. UTTAL es profesor de psicología en la Universidad estatal de Arizona y director del departamento. Se licenció en física en la Universidad de Cincinnati, en 1951, y se doctoró en psicología y biofísica por la estatal de Ohio, en 1957. Uttal ha escrito 13 libros sobre temas de informática, fisiología y psicología experimental. El presente artículo recoge su investigación de tres años en el laboratorio del Centro Naval de Sistemas Oceánicos de Hawai.

La principal ventaja de los teleoperadores reside en su control por el hombre. Durante los últimos treinta años, se han atravesado varios períodos de optimismo en los que se pensaba que se dispondría de robots autónomos, controlados por ordenador, para trabajar allí donde el ser humano correría peligro o donde motivos de tiempo, economía o distancia prohíben su presencia. Esas esperanzas tropezaron, una y otra vez, con dificultades prácticas, pues la técnica de inteligencia artificial necesaria se ha manifestado más difícil de dominar de lo esperado. La solución de algunos obstáculos depende sólo de nuevos avances técnicos. Otras barreras para la automatización total parecen ser más importantes.

Para nuestra fortuna, no tenemos las manos atadas en nuestra dependencia del ordenador, autónomo y totalmente competente, para desarrollar un trabajo útil en lugares peligrosos o lejanos. En muchos casos, los teleoperadores están ya trabajando, como en la reciente exploración de los restos del *Titanic*. Varios laboratorios de todo el mundo, entre ellos el del Centro Naval de Sistemas Oceánicos (NOSC) en Hawai, al que he estado adscrito durante tres años, se esfuerzan en ampliar el papel de estas máquinas teledirigidas. El reto principal lo supone hoy el diseño de conexiones sólidas y flexibles entre el operario y la máquina lejana. Esta tarea está condicionada tanto por las capacidades perceptivas, cognitivas y motoras del hombre como por consideraciones ingenieriles.

Todos los sistemas de teleoperadores comparten varias características básicas: sensores para adquirir información sobre el emplazamiento lejano de trabajo; pantallas que permitan al operario observar la situación; controles a través de los cuales éste ejecuta sus decisiones; un accionador lejano, o herramienta, y —quizá lo más importante— enlaces de comunicaciones para llevar la información desde los sensores hasta la pantalla y desde los controles hasta el accionador. Además, todos los teleoperadores presentan unas exigencias fundamentales de acondicionamiento. La estación de trabajo lejana se tiene que transportar hasta su emplazamiento, ha de poder controlar sus movimientos mientras realiza su trabajo y debe tener suficiente energía para hacer funcionar las herramientas y cualquier vehículo de apoyo.

Los primeros teleoperadores dignos de tal nombre fueron manipuladores a distancia de materiales radiactivos, desarrollados durante los años cuarenta. La pantalla era una simple ventana, a través de la cual miraba el operario; los controles se unían directamente a los actuadores —normalmente garfios o dispositivos de agarre— por medio de conexiones mecánicas: barras rígidas o una combinación de cables e hilos. En los teleoperadores modernos, las conexiones, que suelen ser indirectas, consisten en señales transmitidas por cables eléctricos, fibras ópticas o incluso ondas de radio o televisión. Los actua dores hidraúlicos se han mostrado eficaces en algunos sistemas modernos que funcionan en distancias cortas. Cualquiera que sea la técnica o la distancia a la que actúan, la tarea de los componentes de comunicaciones es la misma. Deben proporcionar información suficiente al operario sobre el estado de la herramienta y el medio en el que actúa, y deben transmitir señales de control que permitan a los actuadores reproducir los movimientos del operario humano.

Hasta aquí, y puesto que la pantalla reproduce la escena que ocurre en un lugar lejano, el operario humano experimenta una sensación de "presencia distante". Se discute todavía si esa ilusión de "estar allí" mejora el rendimiento. Tampoco se conoce la forma de perfeccionar la creación de esta sensación. Es evidente que no se quieren reproducir las propiedades exactas del emplazamiento lejano de trabajo como calor, presión, radiación u otras circunstancias peligrosas, que son, precisamente, las razones principales del recurso a un teleoperador.

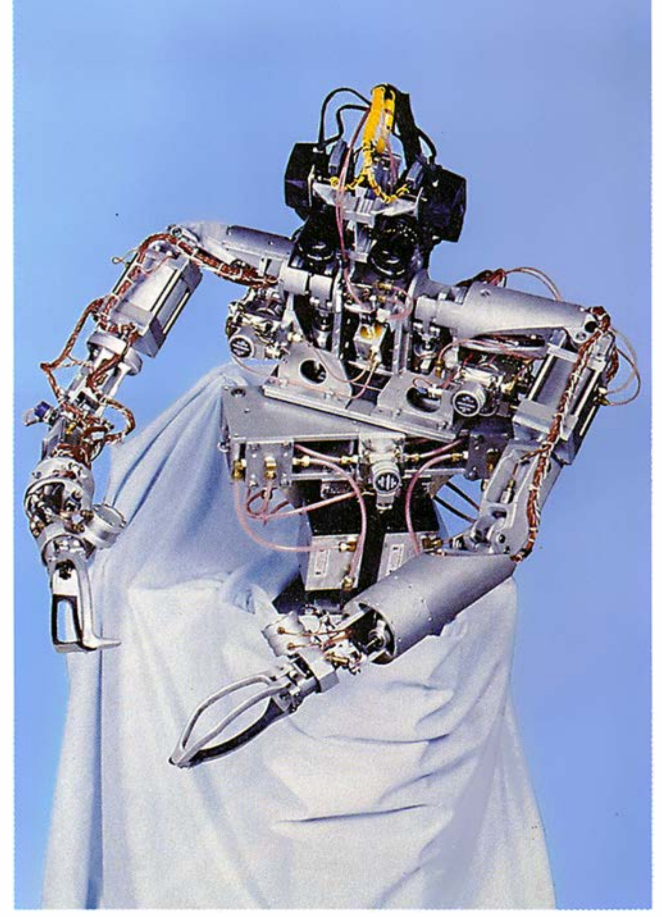
Al mismo tiempo, las discordancias entre la información visual y el ambiente real de trabajo pueden disminuir el rendimiento del trabajo. De ahí el esfuerzo empeñado en la determinación, entre otras cosas, del campo óptimo de visión para la pantalla, que afecta a la velocidad aparente de los objetos que se mueven a través del campo de visión. La decisión sobre los estímulos ópticos y la forma en que se han de suministrar al operario humano configuran el reto principal que tienen la investigación y el desarrollo de los teleoperadores.

En algunos dispositivos de éstos que se desarrollan en el NOSC, el operario contempla una pantalla estereoscópica. Se gobierna ésta mediante cámaras gemelas situadas en la máquina lejana, proporcionando una fuerte ilusión de presencia en el lugar exacto. La separación de las cámaras no debe coincidir necesariamente con la separación normal de los ojos humanos. Se puede mejorar bastante la capacidad del operario para la resolución en profundidad de los objetos separando las dos cámaras. Edward H. Spain, del NOSC, ha descubierto, sin embargo, que existe una separación óptima de las cámaras a partir de la cual la capacidad del operario para discernir la profundidad disminuye, en vez de aumentar.

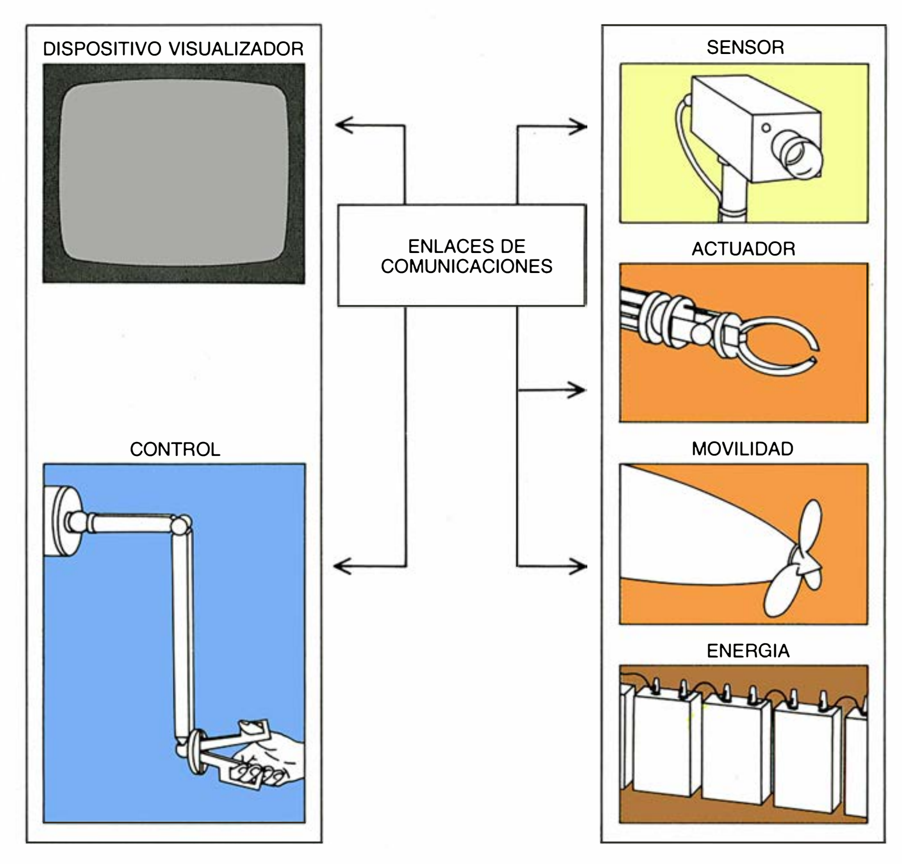
Los sensores de televisión capaces de detectar formas de radiación electromagnética que no sea luz visible pueden ampliar también los poderes de percepción del operario, haciendo posible la "visión" de objetos que normalmente serían invisibles para un observador humano en el emplazamiento de trabajo. En un futuro cercano, es probable que las técnicas de tratamiento de imágenes por ordenador mejoren los datos visuales enviados desde los sensores a la pantalla. Los objetos se separarán de fondos complicados; las superficies con imagen de baja calidad se reconstruirán automáticamente. No obstante, puede que no se necesite mejorar siempre la información visual de poca calidad por medio de un ordenador: las investigaciones del autor indican que un observador puede percibir perfectamente formas u objetos casi enteros, incluso cuando se presenta una imagen incompleta o "ruidosa".

En algunos sistemas, el sonido amplifica las presentaciones visuales; por ejemplo, el sonido puede avisar al controlador de un vehículo submarino teledirigido sobre una colisión en aguas turbias. Los diseñadores están tratando de incorporar también indi-





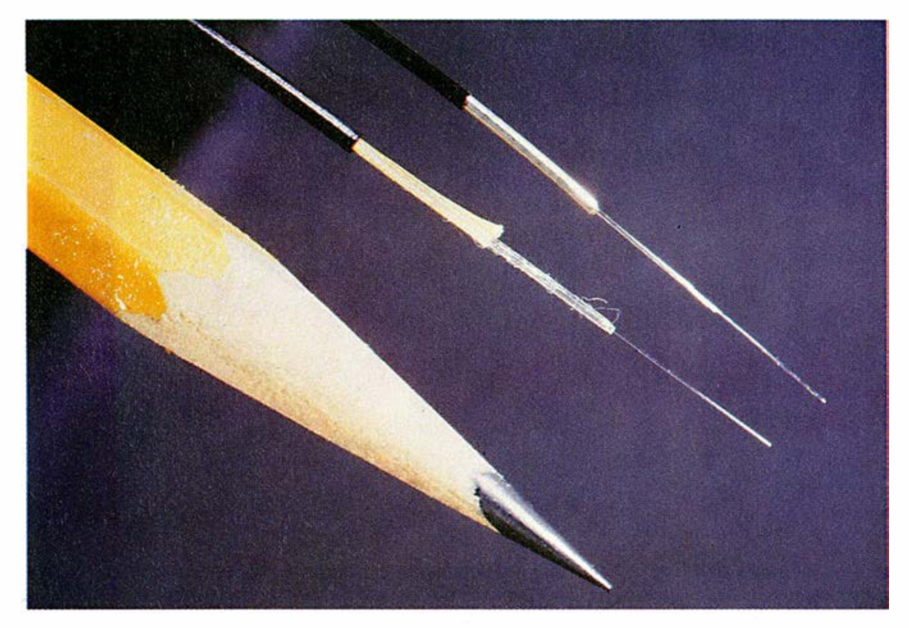
1. TELEOPERADOR "MARCIANO", que permite a un individuo (*izquierda*) manejar una estación de trabajo con forma humana (*derecha*) desde cierta distancia. Dos cámaras de televisión situadas en la estación envían información a dos visores en miniatura que son pantallas de televisión colocadas enfrente mismo de los ojos del operario; también hay transmisión de sonido. Los movimientos de la estación de trabajo reproducen exactamente los del operario. Las señales de control se transmiten hidráulicamente desde el arnés del operario hasta la estación de trabajo. Este sistema experimental se utiliza para estudiar el factor humano en la teleoperación en el laboratorio del Centro Naval de Sistemas Oceánicos de Hawai (NOSC).



2. COMPONENTES de cualquier teleoperador: pantalla, un dispositivo de control, un sensor, una herramienta y enlaces de comunicaciones. Otros componentes pueden proporcionar energía y movilidad.

cadores "táctiles" en los sistemas de teleoperadores. Estos indicadores proporcionarían una realimentación desde las herramientas lejanas, permitiendo que el operario controle la fuerza que ejerce sobre un objeto, evitando así el posible daño. Se están desarrollando ya sistemas en los que la información desde un sensor táctil lejano se reproduce en un indicador sensitivo en forma de guante, lo que posibilita que el operario "palpe" el objeto a distancia.

Un sistema de indicadores táctiles podría proporcionar información sobre la forma de un objeto cuando las señales visuales están oscurecidas, por ejemplo, por aguas turbias, o cuando el trabajo que se realiza queda fuera del campo de la cámara. La posibilidad de "agarrar" un objeto quizá resulte de gran valor en un teleoperador, como lo es para una persona que anda a tientas en la oscuridad o que trabaja con algo fuera de la vista.



3. FIBRAS OPTICAS, de extraordinaria importancia para los enlaces de comunicaciones en teleoperadores. Los cables de hebra única pueden tener un grosor menor de un cuarto de milímetro, y aun así poseen suficiente resistencia mecánica para soltarlos desde un avión sin romperlos.

Mientras que se ha prestado una considerable atención al desarrollo de indicadores visuales y táctiles para teleoperadores, apenas si se ha avanzado en el diseño de nuevos controles, limitados, hasta ahora, a las palancas de mando, interruptores o manivelas. A tenor de su diseño, estos dispositivos deben remedar las respuestas motoras del operario: por ejemplo, cierran su garfio cuando el operario cierra una empuñadura.

La tecnología de los ordenadores ha comenzado a aplicarse, con cierto énfasis e interés, a los sistemas de control de los teleoperadores. Del mismo modo que se puede intercalar un ordenador entre un sensor y el dispositivo de visualización para mejorar la imagen, también puede introducirse en el camino de comunicación entre los controles y el actuador. Un ordenador podría, por ejemplo, eliminar la necesidad de que el control se mueva exactamente con los mismos grados de libertad que el actuador, mediante una traducción automática de la información en un sistema de coordenadas en la acción correspondiente de otro sistema. Cabría también programar un ordenador para amplificar la respuesta de la herramienta de forma no lineal, sin necesidad de que el operario aplique un aumento correspondiente de fuerza en el puesto de control. Otras transformaciones ayudadas por ordenador, complicadas o sencillas, permitirían que la interfase entre el operario y el control correspondiente fuese lo más natural posible.

Se hallan en fase de desarrollo varios controles originales. James D. Foley, de la Universidad George Washington, ha creado un dispositivo semejante a un guante que puede sentir los complejos movimientos de la mano humana y transmitir la información hasta una herramienta en forma de mano situada a cierta distancia [véase "Interfases para ordenadores avanzados", por James D. Foley; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1987]. Otros investigadores han ideado sistemas que emplean señales eléctricas procedentes de los músculos del cuerpo para controlar los movimientos de miembros protésicos. (Aunque las distancias a las que tienen que tra-

bajar estos miembros son mucho menores que las de los teleoperadores normales, tales sistemas plantean problemas parecidos a los que encuentran los diseñadores de teleoperadores.)

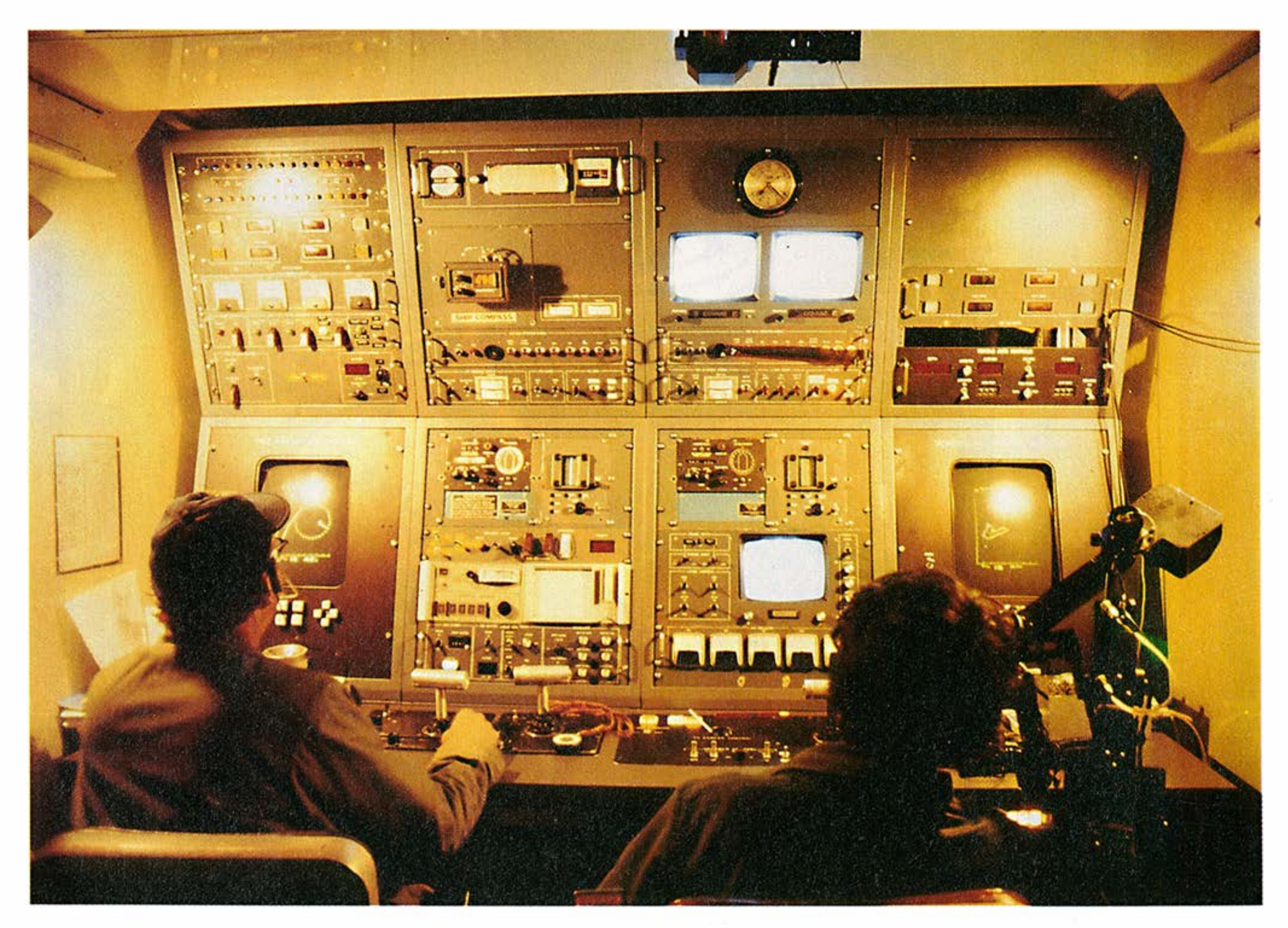
En algunos teleoperadores, los hilos de cobre y las conexiones mecánicas o hidraúlicas bastan para transmitir la información sensorial y de control, respectivamente. No obstante, en la mayoría de los sistemas se tiene que intercambiar cantidades de información mucho mayores entre el operador y el actuador. Los requisitos de transmisión para las señales de control son sencillos, pero un dispositivo de visualización estéreo suele emplear dos canales de banda ancha de televisión en color.

La comunicación entre los sensores y los visualizadores se puede facilitar, a veces, aprovechando las capacidades humanas de percepción. Ross L. Pepper, actualmente en la empresa Science Applications International Co., ha demostrado la posibilidad de reducir la sobrecarga del sistema de comunicaciones mediante la transmisión de una imagen en color con baja resolución por un canal de televisión y una imagen monocromática de alta resolución por otro canal. La combinación de ambas imágenes en el puesto de control ofrece una imagen estéreo cromática de mediana calidad, aunque práctica. La calidad de imagen es buena, hasta el punto de que el observador no se percata de este rentable método de transmisión.

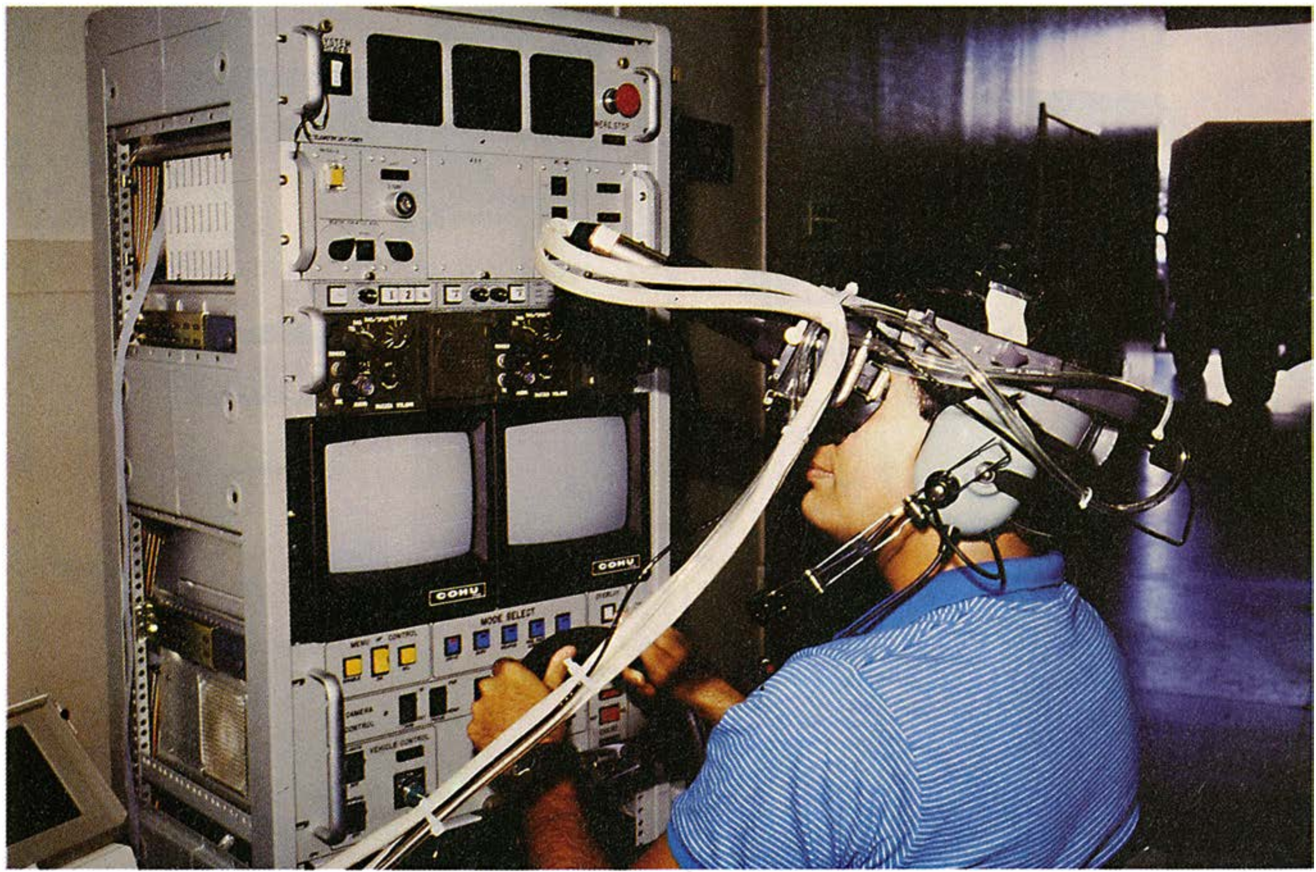
Los teleoperadores diseñados para trabajar a distancias muy grandes, en el espacio o en tierra, deben comunicarse por medio de transmisiones de radio o televisión, así como por señales acústicas en el caso de operaciones oceánicas. Sin embargo, las fibras ópticas han suministrado una eficaz ayuda a los teleoperadores que pueden mantener una unión física entre el operario y la herramienta. Una sola fibra óptica puede transportar hasta 400 millones de bits de información por segundo. El pequeño diámetro de las fibras permite que se puedan desplegar a grandes distancias –hasta alrededor de 300 kilómetros– con un único carrete. Fibras cuidadosamente devanadas se pueden, incluso, soltar a altas velocidades desde aviones, para controlar sistemas militares teleoperados, como ha demostrado Jack E. Holzschuh con fibras desarrolladas, por Arthur T. Nakagawa y sus colaboradores, en el NOSC.

También se están tendiendo fibras ópticas desde barcos para los sistemas submarinos de teleoperación. En estos dispositivos, entre los que se encuentra el "vehículo ligado avanzado", desarrollado por Robert T. Hoffman, en el NOSC, la estación de trabajo lejana se suspende generalmente de un cable que debe suministrar energía y soportar un peso sustancial, además de transportar información. El peso total comprende no sólo el de la estación de trabajo, sino también el del propio cable, que puede tener un peso sorprendente. La sustitución del cobre por fibras ópticas en los enlaces de comunicaciones reduce bastante el peso del cable: de 23 a 9 toneladas, en el caso de un cable que sostenga una estación sumergible a gran profundidad. (Para funciones distintas de las comunicaciones, el cable necesita aún una cantidad importante de cobre, acero y otros materiales.)

Además de ser ligeros y compactos, los cables de fibra óptica son notable-



4. DISPOSITIVOS visualizadores y controles de un sistema teleoperado. Adquieren una refinada complejidad. La fotografía muestra el puesto de control en superficie de una estación submarina remota. El dispositivo en forma de brazo que se ve a la derecha controla un manipulador submarino.



5. VEHICULO TELEOPERADO que se ha convertido en una plataforma de reconocimiento muy práctica, con la que se exploran lugares arriesgados, sin poner en peligro la vida del hombre. El vehículo (*arriba*) tiene dos cámaras en el asiento del conductor y se guía con señales enviadas, a través de una unión de fibra óptica, desde un puesto de control remoto. Los mandos (*abajo*) constituyen una réplica de los de un vehículo convencional.

mente fuertes y resistentes a la ruptura cuando van convenientemente forrados. Este tipo de cables no pierden su integridad óptica ni mecánica, aunque por encima de ellos pasen vehículos repetidamente. Los cables de fibra óptica también son seguros ante el espionaje electrónico, a diferencia de los cables eléctricos.

Después de haber descrito los componentes básicos de un teleoperador y algunas de las dificultades que se oponen a su diseño, se puede hablar de algunos de los sistemas avanzados de teleoperadores del NOSC. Quizás uno de los más estimulantes conceptualmente sea el denominado "marciano": un prototipo de teleoperador antropomórfico. David C. Smith y Frank P. Armogida concibieron el dispositivo y Herbert L. Mummery lo construyó. El operario lleva un arnés en forma de esqueleto y puede ver a través de dos pantallas de televisión que actúan de visores situados enfrente de sus ojos. Los controles del teleoperador consisten en la armadura articulada exoesquelética que sigue los movimientos del operario. Además de reproducir los movimientos de cabeza y brazo, el "marciano" también es capaz de seguir el movimiento del cuello y del tronco.

La estación de trabajo, actualmente separada sólo unos metros del operario, es una "herramienta" de forma humana. La estación tiene dos cámaras de televisión para enviar información visual a las pantallas y dos micrófonos para enviar el sonido hacia los auriculares del operario, lo que proporciona una extraordinaria sensación estereofónica. Mientras tanto, las señales de control procedentes del operario, que se envían a través de un sistema hidraúlico de comunicaciones, mueven el tronco y el cuello, y manipulan los brazos y las manos con forma de garfios. Los movimientos de la estación imitan los del operario.

Los sistemas antropomórficos de teleoperación tienen ventajas especiales y están indicados para ciertos trabajos, como las tareas de reparación submarina, en los que no se puede anticipar la naturaleza exacta de la misión a cumplir. La sensación de presencia distante que se experimenta en el puesto de control del "marciano" es bastante intensa, y el operario apenas si debe recapacitar sobre cómo traducir sus movimientos en los correspondientes en el emplazamiento lejano de trabajo. Con todo, queda mucho trabajo por realizar antes de que estos teleoperadores se conviertan en dispositivos prácticos, capaces de duplicar la destreza humana.

Mientras llega ese momento, Thomas W. Hughes y sus colaboradores están desarrollando una versión teleoperada del VRVGM ("vehículo rodado versátil de gran movilidad") del ejército de los Estados Unidos, que sustituye al clásico todo-terreno ("jeep"). El operario ve el terreno a través de un visualizador estereoscópico instalado en un casco, que recibe señales a través de una conexión de fibra óptica desde unas cámaras de televisión gemelas situadas en una "cabeza" colocada en el asiento del conductor. Las propiedades ópticas de las cámaras y el visualizador tienen complicados efectos sobre la capacidad del operario para controlar el vehículo; estos efectos son todavía objeto de investigación.

Los diseñadores de este teleoperador se enfrentan con una contrariedad humana bastante incómoda: la enfermedad del simulador, eufemismo para designar las náuseas que acaban por incapacitar al operario y que se producen, principalmente, por el conflicto entre la percepción de movimiento del operario (aumentada por la visualización estereoscópica) y la ausencia de estímulos en el oído interno. La susceptibilidad de cada individuo a esta enfermedad del simulador varía bastante; los investigadores intentan ahora determinar las condiciones exactas de los estímulos que la producen.

Otro teleoperador que están construyendo Hughes y sus colaboradores es el "dispositivo aéreo manejado por control remoto" (DAMCR), que es una pequeña plataforma de observación con gran movilidad. El DAMCR puede suspenderse en el aire o moverse bajo control remoto de un operario, y facilitar datos de reconocimiento que podrían ser inaccesibles para un observador en tierra. También en este caso, el papel humano en el sistema plantea cuestiones sugestivas. Aunque el operador humano puede proporcionar una gran cantidad de "poder de cálculo", pequeños cambios en la configuración del sistema pueden afectar decisivamente a la capacidad de control del hombre. Por ejemplo, nadie sabe si deberían instalarse los sensores sobre la plataforma para que el operario tenga la sensación de estar volando en ella o si los sensores deberían observar la plataforma desde cierta distancia. La forma óptima del dispositivo visualizador podría diferir según se trate de un operario novato o de otro experto, y podría variar entre las distintas fases de una misión.

Estos prototipos de teleoperadores demuestran que ya se dispone de la mayor parte de la tecnología física necesaria para construir estos complicados y útiles dispositivos. Los principales desafíos residen en la interfase entre el hombre y la máquina. Hasta que los progresos en tecnología de ordenadores posibiliten la sustitución de la inteligencia humana por la artificial, las intuiciones psicológicas sobre el mejor acoplamiento del hombre y la máquina marcarán el ritmo de la evolución de las estaciones de trabajo remotas.



6. PLATAFORMA VOLANTE que se puede controlar a distancia desde un puesto de mando. La plataforma experimental, que tiene una altura aproximada de sesenta centímetros, y se eleva por medio de una hélice, puede suspenderse en el aire o reconocer grandes superficies. Las cámaras pueden enviar señales a una pantalla, con lo que el operario tiene la impresión de encontrarse realmente a bordo del dispositivo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HUMAN FACTORS APPLICATIONS IN TELEOPERATOR DESIGN AND OPERATION. Edwin G. Johnsen y William R. Corliss. John Wiley & Sons, Inc., 1971.

VISUAL PERFORMANCE AND FATIGUE WITH STEREOSCOPIC TELEVISION DISPLAYS. E. H. Spain, R. E. Cole y R. L. Pepper en *Proceedings of the Robotics and Remote Handling in Hostile Environments*. National Topical Meeting ANS, Gaitlinburg, págs. 61-67; 23-27 de abril de 1984.

TELEOPERATION AND ROBOTICS, vols. 3A y 3B. Jean Vertut y Philippe Coiffet. Prentice Hall, 1986.

THE PERCEPTION OF DOTTED FORMS. W. R. Uttal. L. Erlbaum Associates, 1987.

Los misterios mitraicos

Las imágenes de este antiguo culto mediterráneo se pueden interpretar en términos de una concepción del mundo que situaba no en la tierra, sino en los astros, los poderes que rigen el destino de los hombres

David Ulansey

Por todos los territorios del imperio romano, desde Britania hasta Siria, se encuentran a centenares unos templos subterráneos, en los que los modernos arqueólogos han descubierto pinturas y relieves de un joven que está dando muerte a un toro. El significado de esta representación, que era la escena central de un culto mistérico conocido por el nombre de mitraísmo, ha venido siendo uno de los grandes enigmas arqueológicos aún por resolver en nuestro siglo. ¿A qué suceso mítico se refieren estas figuras? ¿Qué querría decir en las doctrinas de aquel culto el sacrificio del toro? El autor y algunos investigadores han llegado a la conclusión, poco convincente tal vez a primera vista, de que esa imagen no representa ningún mito basado en acontecimientos terrenales, sino que es más bien un código astronómico, con marcadas implicaciones religiosas.

Esta sorprendente interpretación gana en credibilidad cuando se la considera a la luz de las frecuentes agitaciones religiosas y sociales de aquella época. Durante los siete siglos que transcurren desde Alejandro Magno hasta Constantino, la civilización mediterránea dio pruebas de ser un campo extraordinariamente fértil para el desarrollo de nuevas religiones. Las conquistas de Alejandro, consolidadas por sus sucesores helenísticos y romanos, habían creado rápidamente una unificada cultura mediterránea, a partir de lo que antes era tan sólo un abigarrado conjunto de diferentes naciones, ciudades-estado y tribus. Las formas más antiguas de expresión religiosa, que generalmente habían sido producto de sociedades más pequeñas y cerradas sobre sí, se fueron haciendo incapaces de dar un significado a la vida de los individuos, que se sentían como perdidos y a la deriva en medio de aquel imperio, cada vez más extenso y más impersonal.

A medida que los imperios helenístico y romano fueron absorbiendo las antiguas ciudades-estado y las viejas tribus, la gente empezó a notar que los poderes que gobernaban sus vidas quedaban fuera de su alcance, en las partes más lejanas del imperio. Cualquier filosofía o religión que pudiese ofrecer a tan desvalidos súbditos un sentimiento de comprensión o de control resultaría sumamente atractiva.

La extraordinaria difusión del cristianismo estuvo en función de tales condicionamientos: la doctrina cristiana convertía en miembros de una comunidad simbólica –el "Nuevo Israel"– a gentes cuyas comunidades reales, inmersas a la sazón en el orden imperial, no podían ya conferirles ningún firme sentimiento de identidad. Otra respuesta a esas condiciones fue el auge del fatalismo: la idea de que la vida está completamente controlada por un hado o sino impersonal. De hecho, llegó a adorar a una personificación del Hado o de la Fatalidad como a un dios en muchos cultos helenísticos. El nombre de una filosofía helenística que hizo suya esta concepción fatalista del mundo, el estoicismo, sigue significando, todavía hoy, el resignado aguante de cuanto pueda acontecernos en la vida.

El general fatalismo de la época preparó el camino para el éxito del más específico fatalismo de la astrología. La astrología, que empezó a obtener aceptación popular durante el período helenístico (el subsiguiente a las conquistas de Alejandro Magno), pretendía, rodeando sus asertos con el persuasivo halo de una exactitud matemática, que todos los sucesos estaban predeterminados por poderes que residían en los astros. El auge del fatalismo y de la astrología durante esta época hace verosímil que surgiera una religión basada en la observación de las estrellas y el culto a los astros.

El culto conocido como misterios mitraicos, o mitraísmo, fue una de las más importantes –y también, sin duda, de las más enigmáticas– religiones que surgieron aproximadamente al mismo tiempo que el cristianismo. Vino a la existencia en el signo I a. de J. C.; según Plutarco, los piratas cilicios practicaban ritos mitraicos por el año 67 a. de J. C. (Aquellos piratas, con bases en la provincia de Cilicia, en el Asia Menor, serían alrededor de 20.000; en su mejor momento, llegaron a operar por todo el mar Mediterráneo.) El mitraísmo alcanzó su cenit en el siglo III y acabó sucumbiendo ante la expansión del cristianismo, a finales del siglo IV, cuando el imperio romano ya se desintegraba.

La feligresía mitraica estaba formada en su mayor parte por soldados, funcionarios estatales y mercaderes; las mujeres quedaban excluidas de este culto. Como otras varias religiones antiguas (los misterios de Isis y los misterios eleusinos entre ellas), el mitraísmo sólo admitía como adeptos a quienes habían pasado por una secreta iniciación ritual. A los iniciados se les prohibía hablar con los profanos sobre los secretos del culto, por lo que éstos eran llamados *mysteria*, palabra cuya raíz significa guardar silencio. El vocablo "misterio" y sus afines en nuestras lenguas modernas, tales como "misticismo", derivan, en última instancia, del nombre con que se designaron en griego aquellos cultos.

DAVID ULANSEY es profesor del departamento de religión de la Universidad de Boston. Sus intereses como investigador comprenden las antiguas religiones mediterráneas y los orígenes del cristianismo. Licenciado y doctor en filosofía por la Universidad de Princeton, ha enseñado en el departamento de historia de la Universidad de California en Berkeley, antes de hacerlo en la de Boston. Su libro *The Origins of the Mithraic Mysteries* se publicó el pasado otoño; está trabajando actualmente en la redacción de otra obra sobre la función del simbolismo cosmológico en el cristianismo primitivo.

El mitraísmo estaba organizado en torno a siete distintos grados de iniciación, que formaban una estructura jerárquica por la que los miembros iban ascendiendo gradualmente.

Lo secreto del culto explica por qué no ha sobrevivido ningún documento escrito de las doctrinas mitraicas. En consecuencia, la única información de que disponen los estudiosos para reconstruirlas consiste en la elaborada iconografía que decora los mitreos o templos mitraicos. La mayor parte de tal iconografía representa diversas actividades del dios Mitra; la escena crucial es el llamado taurobolio o sacrificio del toro, en el que Mitra, acompañado por varios personajes, aparece en el acto de dar muerte a un toro. Puede decirse que no hay mitreo en el que no conste, en el lugar más destacado de su estructura, esta escena de tauroctonía, y está claro que tal imagen encierra la clave del secreto central de los misterios mitraicos. Pero, careciéndose de toda información o explicación escrita, el interpretar dicha imagen ha resultado ser una tarea muy ardua.

Durante la mayor parte del siglo XX, los intentos interpretativos de los estudiosos a propósito de la tauroctonía mitraica estuvieron dominados por la obra de Franz Cumont, famoso historiador belga de la religión. La interpretación de Cumont, presentada por primera vez en 1899, se basaba en el hecho de que *Mithras* es el nombre griego y latino de un dios iranio mucho más arcaico, Mitra. Cumont concluía que el mitraísmo fue una importación del antiguo culto iranio a Mitra, que representaba la luz y la verdad, y era tenido por especial valedor y custodio de los contratos y los pactos. Para Cumont, interpretar debidamente la tauroctonía era mera cuestión de hallar paralelos a sus elementos simbólicos en la antigua mitología irania.

El enfoque de Cumont tropezaba con graves problemas. El más importante de ellos era que no se conoce ningún mito iranio en el que Mitra tenga nada que ver con la matanza de un toro. Cumont se aferraba, en cambio, a un mito iranio de la creación, en el que Arimán, la personificación del mal, da muerte a un toro, de cuyos sangrientos restos nacen después todos los seres vivientes de la tierra. Aseguraba (sin poder aducir prueba alguna) que hubo de existir una variante de este mito, en la que el perverso Arimán fue sustituido,



1. SACRIFICIO DEL TORO, esculpido en un relieve procedente de la Germania; se trata de la principal representación sagrada de la religión mitraica. Las figuras que se ven alrededor de la escena central simbolizan las constelaciones y las que decoran la arcada superior son los signos del Zodíaco. Patentízase aquí el penetrante influjo de los símbolos astrológicos en las creencias mitraicas. El autor del artículo sostiene la tesis según la cual esta imagen representa la astronómica precesión de los equinoccios. Hacia el año 2000 a. de J. C., el equinoccio de primavera, que había estado en la constelación de Tauro, pasó a la de Aries. Los mitraístas creían que su dios controlaba la precesión; el sacrificio del toro simboliza este poder.

como sacrificador del toro, por el buen dios Mitra. El prestigio de Cumont era tan grande que sus teorías permanecieron virtualmente indiscutidas durante más de setenta años.

El nexo iranio, y con él la interpretación que diera Cumont a la tauroctonía, fueron objeto de un ataque general en el Primer Congreso Internacional de Estudios Mitraicos, celebrado en la Universidad de Manchester, en 1971. Varios especialistas, entre los que se destacaron John Hinnells, de Manchester, y R. L. Gordon, de la Universidad de East Anglia, sugirieron que el mitraísmo se había orginado, de hecho, como una religión enteramente nueva en algún lugar del mundo grecorromano, y que sólo había adoptado el nombre del dios iranio para dar un tono exótico y adquirir una aureola de antigüedad.

Si la tauroctonía no representaba ningún mito iranio, ¿qué representaba entonces? A mediados de los años setenta, unos cuantos estudiosos (entre ellos, Roger Beck, de la Universidad de Toronto, Stanley Insler, de la de Yale, Michael Speidel, de la de Hawai, Alessandro Bausani, de la de Roma, y el autor de estas líneas) empezamos a proponer nuevas interpretaciones de la tauroctonía (y de todo el mitraísmo), basadas en la hipótesis de que la imagen en cuestión no era otra cosa que un mapa estelar.

Por la época en que se originó el mitraísmo, la vida religiosa e intelectual de la cultura mediterránea estaba transida de creencias astrológicas. Debíase esto, en parte, al fatalismo que generalmente predominaba. Pero, además, habiendo roto los individuos con las tradiciones locales, y siendo libres de moverse a voluntad por todas las regiones del imperio, la astrología venía a satisfacer su necesidad de unos símbolos nuevos que les ayudasen a comprender el sentido de la vida cotidiana, sin vincularles a una localidad o comunidad determinada, como lo hacían las viejas formas religiosas. En cualquier parte del imperio en la que se viviese o por la que se viajara, eran unas mismas las configuraciones estelares, por lo que proporcionaban la más ideal materia prima para un universal sistema de símbolos.

La aceptación de la astrología fue incrementando la creencia de que la genuina morada de los dioses se hallaba en la esfera de las estrellas. Así, por ejemplo, fue en el período helenístico cuando se popularizó la práctica de poner a los planetas los nombres de dioses griegos, como Zeus (Júpiter) y Ares (Marte). La astrología fomentó también una nueva concepción de la vida tras la muerte, según la cual el alma del finado no descendía a un mundo subterráneo, como se había creído anteriormente, sino que se elevaba a través de las es-



2. TEMPLOS MITRAICOS o "mitreos"; se construyeron, bajo tierra, por todas las regiones del imperio romano. La mayoría de los vestigios del culto mitraico se han hallado en Italia y a lo largo de las cuencas del Rhin y del Danubio, en zonas guarnecidas por legiones romanas. Muchos mitraístas

feras de los planetas, hasta la de las estrellas fijas y, por último, hasta el empíreo o paraíso, situado más allá de la esfera superior. Con el tiempo, llegó a imaginarse este viaje como difícil y peligroso, requiriéndose secretas contraseñas para cruzar cada uno de los umbrales planetarios.

Los conceptos astronómicos debieron de ser importantes en el mitraísmo, a juzgar por la frecuente aparición de símbolos astrales en la iconografía mitraica. Los 12 signos del Zodíaco y símbolos del Sol, de la Luna y de los planetas aparecen a menudo junto con la tauroctonía y en todas las representaciones del arte mitraico. El autor clásico Eubulo, que escribió sus obras en el siglo I o II, dijo que el mitreo o templo mitraico era considerado como "una imagen del cosmos". Hoy parece claro que la tauroctonía misma era un símbolo astral.

Además de Mitra y el toro, la representación de la tauroctonía recoge otras figuras: un perro, una serpiente, un cuervo, un escorpión y, a veces, un león y una copa. No puede ser mera casualidad que cada una de tales figuras tenga un paralelo entre las constelaciones: Can Menor, Hidra, Cuervo, Escorpión, Leo y Cratera; el toro tiene su equivalente en Tauro. Mi trabajo se ha orientado a explicar cómo estas constelaciones pudieron llegar a constituir la imagen central de un poderoso movimiento religioso.

Pues bien, he averiguado que estas siete constelaciones se hallan tan vinculadas entre sí en el cielo como lo están en la tauroctonía. A excepción de Leo, todas ellas se encuentran a lo largo de una línea definida por una antigua posición del ecuador celeste, el cual es una proyección del ecuador terrestre sobre la esfera del cielo: un círculo imaginario con un ángulo de 23 grados de inclinación respecto al plano de la órbita terrestre (la eclíptica, o plano que define el círculo zodiacal). El ecuador celeste cruza el zodíaco en los equinoccios, –que son los puntos de la esfera celeste en los que parece hallarse el sol el primer día de primavera y el primer día de otoño.

En la antigüedad, el ecuador celeste era mucho más que un mero círculo imaginario. Los astrónomos antiguos creían que la Tierra permanecía absolutamente inmóvil en el centro del universo y que las estrellas "fijas" estaban unidas a una gran esfera que rotaba en torno a la Tierra, dando una vuelta completa cada día, sobre un eje que unía los polos norte y sur de la esfera. Los puntos principales de ésta, tales como polos y ecuador, desempeñaban un papel importantísimo en la antigua concepción de la estructura del cosmos. De aquí que, en la antigüedad, fuese mucho más conocido que hoy el ecuador celeste; por ejemplo, Platón, en su diálogo *Timeo*, escribe que el demiurgo, hacedor del universo, inició la formación del cosmos dando a su sustancia la forma de la letra X para representar el cruce de la eclíptica con el ecuador celeste.

La mayoría de los antiguos creían que el eje de la esfera celeste era inmóvil, lo mismo que el de la Tierra. De hecho, el eje de rotación de la Tierra (el equivalente moderno del antiguo eje cósmico) no está fijo, sino que se bambolea. Con sus oscilaciones, se bambolea también a la par el ecuador celeste, y así las posiciones respectivas del ecuador y de la eclíptica van cambiando. Lo que se llama la posición equinoccial del Sol en el firmamento retrocede a lo largo de la eclíptica, y así el equinoccio se adelanta ligeramente cada año. La precesión completa se produce en unos 25.920 años; el Sol atraviesa una constelación cada 2160 años. Hoy día, el equinoccio de primavera está en la constelación de Piscis; allá por el año 2200 entrará en la de Acuario. Durante la época grecorromana, el equinoccio de primavera estaba en Aries, donde había entrado hacia el año 2000 a. de J. C. Con anterioridad, se hallaba en Tauro.

A excepción de Leo, todas las constelaciones simbolizadas en la tauroctonía están sobre el ecuador celeste, tal como se las habría visto cuando el equinoccio de primavera se hallaba en Tauro. (Leo señala la posición que, en el solsticio de verano –cuya posición va también cambiando por la precesión–, tenía el Sol en aquel entonces.) Así, pues, la disposición de las constelaciones en la tauroctonía corresponde a una situación astronómica que se dio 2000 años antes de que se originara el mitraísmo.

¿Cómo podrían los mitraístas tener conocimiento de aquella antigua disposición de los astros y por qué verían en ella un significado religioso? La precesión de los equinoccios fue ignorada durante la mayor parte de la antigüedad. La descubrió el astrónomo griego Hiparco, hacia el 125 a. de J. C., sólo unas décadas antes del surgimiento inicial del mitraísmo. Tras cuidadosas observaciones, el sabio griego logró demostrar que el ecuador celeste iba retrocediendo gradualmente a lo largo del Zodíaco. Sus cálculos pusieron también en claro qué constelaciones habrían estado sobre el ecuador celeste cuando el equinoccio se hallaba en Tauro (que fue su posición más reciente con anterioridad al período grecorromano).

Desde el punto de vista de la concepción geocéntrica, la precesión (un movimiento de la Tierra) parece ser un movimiento de toda la esfera cósmica. Para quienes concebían el mundo geocéntricamente y creían a la vez que los movimientos de los astros influían en los destinos humanos, el descubrimiento de la precesión debió de ser algo enormemente revolucionario: ¡la esfera estable de las estrellas fijas se estaba desplazando por una fuerza al parecer mayor que el cosmos mismo! Los intelectuales antiguos, acostumbrados a ver la acción de los dioses en las obras de la naturaleza, no tendrían mucha dificultad en interpretar este grandioso movimiento como la prueba evidente de la existencia de una poderosísima deidad insospechada hasta entonces.

El significado de la tauroctonía se hace ahora claro: la muerte del toro



eran soldados o funcionarios estatales, por lo que su religión tuvo gran arraigo en las provincias.

simbolizaba muy bien el final del reinado de Tauro como constelación del equinoccio de primavera y el comienzo de la era más reciente. Todas las otras figuras que aparecen en la tauroctonía representan constelaciones cuya especial posición en el firmamento llegó a su fin por efecto de la precesión.

Matando al toro –causando la precesión de los equinoccios–, Mitra estaba moviendo, en realidad, el universo entero. Un dios capaz de llevar a cabo tan tremenda hazaña sería merecedor del supremo culto. Además, no podría menos de creerse que un poder tan grande como para mover el mundo capacitaría también a Mitra para hacer otros portentos, tales como dominar las fuerzas del hado que residían en las estrellas, y garantizar al alma, tras la muerte, un tránsito seguro a través de las esferas planetarias.

Otras imágenes mitraicas indican que se creía, en efecto, que Mitra era la personificación de tal poder cósmico; hay escenas que muestran a Mitra llevando sobre el hombro la esfera del Universo o en las que un Mitra juvenil sostiene en una mano la esfera cósmica mientras con la otra hace girar el Zodíaco. En varias tauroctonías aparece el firmamento estrellado puesto al abrigo bajo el manto de Mitra.

El que a Mitra se le tuviese por la fuerza motriz causante de la precesión del equinoccio explicaría también la naturaleza secreta de los misterios mitraicos. Los adeptos podrían muy bien haber creído que su conocimiento constituía un poderoso secreto, que mejor era guardar para sí y en el círculo de unos selectos iniciados. Para aquellos escogidos, el llegar a comprender la compleja estructura astronómica subyacente a la naturaleza de Mitra requeriría, sin duda, un largo período de adoctrinamiento. Sólo después de adquirir el necesario conocimiento, podrían los iniciados apreciar debidamente a su nuevo dios.

Queda por resolver una cuestión importante. Si todas las figuras que aparecen en la tauroctonía representan constelaciones, ¿qué constelación representa entonces Mitra? En la escena del taurobolio Mitra está situado precisamente por encima del toro, y se le figura siempre como un joven que empuña una daga y se cubre con el característico gorro frigio, un tocado cónico. Pues bien, en el firmamento, justo encima de Tauro, hay una constelación típicamente representada como un joven que empuña una daga y se toca con un gorro frigio: el héroe griego Perseo. Por otra parte, Perseo recibió culto divino en Cilicia, la misma región donde Plutarco sitúa los orígenes del mitraísmo.

Tarso, la ciudad capital de la Cilicia, fue el hogar de una de las más importantes comunidades intelectuales del Mediterráneo. En esta comunidad predominaron los filósofos estoicos, que eran famosos no sólo por su fatalismo (que les inclinaba a creer firmemente en la astrología), sino también por su tradicional personificación de las fuerzas naturales en forma de dioses y héroes. Muy probablemente, el mitraísmo surgiría entre algunos intelectuales de Tarso que, al especular sobre la fuerza responsable de la recientemente descubierta precesión de los equinoccios, personificaron esa fuerza identificándola con Perseo, el dios local de la Cilicia. Después de todo, Perseo ya estaba identificado con una constelación, y el mensaje de su posición en el cielo era claramente interpretable.

Pero si Mitra originariamente fue, en algún sentido, Perseo, ¿cómo vino a ser su nombre "Mitra"? En primer lugar, por supuesto, no sería de extrañar que una religión mistérica ocultase el verdadero nombre de su dios. En segundo lugar, a causa de cómo sonaba su nombre, Perseo pasó, en la antigüedad, por ser el fundador de Persia (Irán) y, así, podría fácilmente habérsele vinculado en la mitología con Mitra, el dios iranio de la luz y de la verdad. En tercer lugar, en la época en que se originó el mitraísmo, la mayor parte del Asia Menor llegó a estar bajo el control del rey Mitrídates del Ponto, quien mantuvo una fuerte alianza con los piratas cilicios. Mitrídates pertenecía a una dinastía que derivaba su nombre de Mitra; además, él y sus antepasados creían descender de Perseo. Sería probablemente en los círculos en torno al rey Mitrídates –que se imaginaba ser un intelectual y tenía un especial interés por las creencias religiosas de los griegos– donde se formaría el nexo entre Perseo y Mitra, que induciría después a la adopción del nombre de *Mithras* (forma griega de Mitra).

Hoy en día, el cristianismo es una de las religiones predominantes en el mundo; el mitraísmo (así como gran cantidad de otros cultos) se extinguió. ¿Por qué?

Una diferencia crucial entre los dos es que el cristianismo procuró, desde sus comienzos, lograr el mayor número de conversiones posible. El autor del evangelio de Mateo, por ejemplo, termina el libro poniendo en boca de Jesús este mandato: "Id, pues, haced discípulos de todas las naciones". En cambio, el mitraísmo

3. ECUADOR CELESTE (*disco púrpura*). Se mueve por el firmamento conforme a la precesión del eje de la Tierra. De ahí que los equinoccios (los puntos donde el ecuador celeste corta el plano de la eclíptica) vayan retrocediendo a través de las constelaciones del Zodíaco. Quienes creían que la Tierra era el centro del universo interpretaron la precesión como un movimiento de la esfera celeste, y, por tanto, como un trastorno del cosmos entero. Las figuras que aparecen en la tauroctonía, o sacrificio del toro, representan constelaciones que estuvieron sobre el ecuador celeste entre los años 4200 y 2000 a. de J. C. aproximadamente, cuando el equinoccio de primavera se hallaba en Tauro.

se basaba en un secreto, y los secretos pierden su atractivo en proporción directa al número de personas que los conocen.

Añádase que el mitraísmo cundió principalmente en grupos de individuos –soldados, burócratas, mercaderes– que estaban muy ligados al orden social existente en el imperio, y la estructuración jerárquica de su culto religioso se adaptaba muy bien a aquel orden, cosa que no ocurría con el cristianismo primitivo, por su apocalíptica doctrina del pronto retorno del Mesías y del despego respecto a los intereses terrenales. Los primeros cristianos (que solían ser gentes de condición social, a menudo, de un modo u otro, problemática) estaban animados de un celo proselitista y revolucionario que faltaba totalmente en el mitraísmo.

Mientras los primeros cristianos trataban de iluminar con su luz el mundo, quienes asistían a los misterios mitraicos buscaban únicamente la iluminación individual y el seguir prosperando dentro de la cultura y el orden establecidos. En consecuencia, los mitraístas no dudaron en adoptar prácticas que, por fuerza, habrían de limitar el número de sus prosélitos, tales como la de excluir del culto a las mujeres, construir sus templos en forma de pequeñas cavidades subterráneas y exigir el cumplimiento de una complicada serie de ritos iniciáticos.

Pero el quid de la cuestión no es tanto por qué el mitraísmo se difundió mucho menos que el cristianismo, cuanto cómo logró éste el espectacular éxito que obtuvo: hacia el final del siglo IV, había conseguido eliminar casi por completo del mundo mediterráneo a las otras religiones rivales.

Cuáles fueran las causas precisas del éxito del cristianismo es, desde luego, una cuestión que discuten ampliamente los especialistas. Sin embargo, se está, por lo general, de acuerdo en que uno de los factores más importantes fue el exclusivismo. Quienes se convertían al cristianismo debían abandonar todas las demás formas de culto religioso. Las otras religiones de la época no pedían una fidelidad tan rigurosa y exclusiva: se podía ser un iniciado de Mitra y también de Isis, sin dejar de tomar parte en los sacrificios a Júpiter, ni de venerar al espíritu de un emperador difunto. En unos tiempos en los que mucha gente estaba experimentando el colapso de las antiguas tradiciones y el agotamiento de sus fuentes de sentido, la radical exclusividad del cristianismo ejercía un atractivo poderoso: a los conversos en ciernes les brindaba la oportunidad de hacer una elección verdaderamente decisiva; quienes llegaban, de hecho, a convertirse podían creer que su vida había adquirido auténtica finalidad y significación. En una época de confusión, el cristianismo ofrecía a sus adeptos un claro sentido de identidad.



4. TAUROCTONIA pintada, en el siglo segundo de nuestra era cristiana, en Italia. El dios Mitra se ha representado en una posición (respecto a Tauro) equivalente a la de la constelación que simboliza al héroe griego Perseo, con el que se vinculaba a Mitra. En la imagen superior las estrellas y los planetas se encuentran bajo el manto de Mitra, figura del poder del dios sobre el universo.

Es particularmente interesante advertir que el cristianismo apeló a algunas de las mismas concepciones religioso-astrales que había tras el mitraísmo y otras religiones. A Jesús se le representaba con frecuencia como dominador del firmamento estrellado. Por ejemplo, el autor del evangelio de san Marcos (la redacción primera de los evangelios) asegura, casi al comienzo de su relato, que Jesús, en el momento de su bautismo, "vio abrirse los cielos en torno suyo". Mediante esta imagen, parece que el escritor sagrado trató de transmitir la idea de que la vida de Jesús constituía una ruptura del orden cósmico, la expresión de un poder más grande que el de los cielos.

El mismo autor presenta a Jesús diciendo cosas como que "en aquellos días... caerán las estrellas del cielo... El cielo y la tierra pasarán, pero mis palabras no pasarán". En la carta de Pablo a los gálatas, se lee: "mientras fuimos niños, vivíamos sometidos a las fuerzas elementales del mundo, pero al llegar la plenitud de los tiempos, envió Dios a su Hijo... para liberarnos". Exactamente igual que Mitra, moviendo la esfera celeste, habría cambiado el orden del universo, así también se creyó que la venida de Jesús había producido una ruptura en el orden del cosmos.

No sólo el cristianismo y el mitraísmo primitivos, sino otras muchas religiones y diversos movimientos filosóficos de aquel período expresaron el mismo anhelo de identificación con una fuerza que fuese capaz de romper las barreras del cosmos y proporcionar acceso a unos reinos que estuvieran allende los límites de la experiencia ordinaria. Tal anhelo era fomentado por las frecuentes agitaciones y calamidades de aquellos tiempos: al socavarse y hundirse los fundamentos locales de la cultura, los individuos oteaban, ansiosos, otros horizontes más dilatados. Y coetáneamente, la imaginación de los científicos pretendía abarcar en una gran visión las esferas celestes. Nuestro mundo de hoy, con su cultura más global cada vez, y con una ciencia que, en una sola generación, ha conseguido rebasar con sus indagaciones las más lejanas galaxias, muestra sorprendentes paralelismos con aquella antigua época de la civilización mediterránea.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE MYSTERIES OF MITHRA. Franz Cumont. Segunda edición revisada, traducida por Thomas J. McCormack. Dover Publications, Inc., 1956.

MITHRAISM SINCE FRANZ CUMONT. Roger Beck en *Aufstieg und Niedergang der Römischen Welt*, 2.ª parte, vol. 17, 4. Dirigido por Hildegard Temporini y Wolfgang Haase. Walter de Gruyter, 1984.

MITHRAIC STUDIES: A PARADIGM SHIFT? David Ulansey en *Religious Studies Review*, vol. 13, n.º 2, págs. 104-110; abril de 1987.

THE ORIGINS OF THE MITHRAIC MYSTERIES. David Ulansey. Oxford University Press, 1989.

Taller y laboratorio

¿Por qué, al inflar un globo, los primeros soplidos resultan ser los más trabajosos?

Jearl Walker

El hinchar un vulgar globo de goma es, por supuesto, un juego de niños, pero el proceso en sí plantea algunas cuestiones desconcertantes. ¿Por qué soplar suele costar más al comienzo y luego resulta menos trabajoso, cuando el globo está ya parcialmente inflado? (Parece que lo normal sería que fuera haciéndose cada vez más dificultoso al tiempo que la goma se va tensando.) Cuando se infla un globo cilíndrico, ¿por qué la hinchazón comienza concentrándose en una zona y después se propaga al resto del globo? Supongamos que tenemos dos globos iguales, los inflamos a tamaños distintos y luego los conectamos a través de un tubo. ¿Pasará aire de un globo a otro, cambiando éstos de tamaño? Y, si es así, ¿alcanzarán al final el mismo tamaño?

Para responder a estas preguntas, tendré primero que echar mano de algo más sencillo: las pompas de jabón. El tamaño de éstas es el resultado de la pugna entre dos fuerzas. Una procede de la presión del aire interior, que trata de agrandar la pompa. (De hecho, esa fuerza se debe a la diferencia entre la presión interna y la presión atmosférica, que es menor; pero aquí por "presión interna" entenderemos la diferencia entre ambas.) Oponiéndose a la expansión actúa la tensión superficial de la película jabonosa, que se debe a la atracción eléctrica entre las moléculas ubicadas en las superficies interior y exterior de la película y sus aledaños; tensión que propende a contraer la pompa.

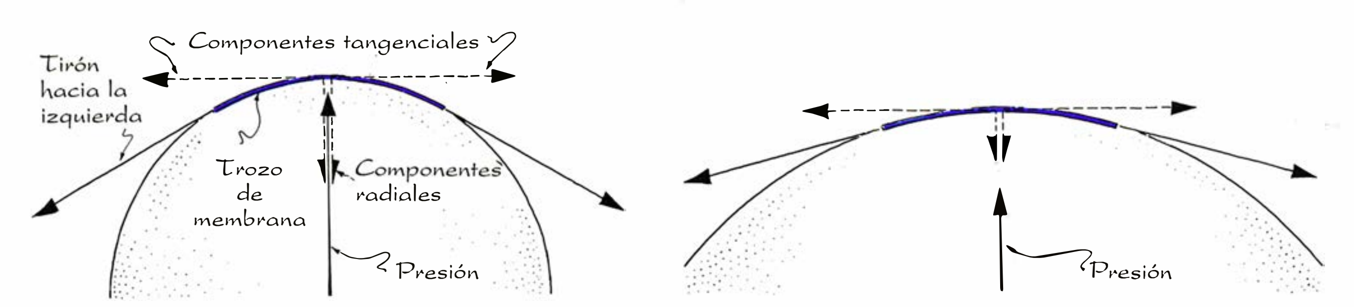
Cuando se hincha una pompa, las fuerzas en juego ajustan automáticamente el tamaño y la presión de la misma hasta que esas fuerzas se igualan. En ese estado de equilibrio, la presión es proporcional a la curvatura e inversamente proporcional al radio de la pompa. Adviértase que esto significa que el aire encerrado en una pompa pequeña está a mayor presión que el encerrado en una pompa grande.

Para entender por qué la presión es menor cuando el radio es mayor, consideremos la sección transversal de una porción de burbuja [*figura 1*]. Las zonas colindantes de la película estiran de los bordes de ese trozo de burbuja. Cada fuerza puede descomponerse en una fuerza tangencial al centro de la porción de burbuja considerada y otra perpendicular. Las componentes tangenciales tienen la misma intensidad y tiran del trozo en sentidos opuestos; se anulan, pues, unas a otras. Las componentes perpendiculares tienen también la misma intensidad; pero, como ambas apuntan hacia dentro en dirección radial, se suman. Cuando la pompa está en equilibrio, la presión del aire ejercida sobre el trozo de membrana contrarresta el tirón hacia dentro debido a las componentes radiales.

La fuerza que tira hacia los lados del trozo de pompa depende sólo de la tensión superficial, y ésta no varía al inflarse la pompa. Qué fracción de esa fuerza es radial depende, empero, de la curvatura de la superficie. Como la presión del aire se opone a las componentes radiales, la presión depende asimismo de la curvatura. Cuando la pompa es pequeña y fuertemente curvada, las componentes radiales son grandes; por tanto, lo será también la presión. Si la pompa la hinchamos más, la superficie pierde curvatura y las componentes radiales y la presión decrecen.

Todo esto podría comprobarlo el lector. Mójese una paja de sorber refrescos en un cuenco de agua mezclada con detergente para vajillas y luego sóplese por el otro extremo de la paja para iniciar la pompa. Conforme ésta crece, la presión del aire a insuflar decrece porque mengua la presión dentro de la pompa. Desde luego, con la poca fuerza que se requiere para inflar una pompa, incluso al principio, puede que no notemos diferencia.

Como la tensión superficial en una pompa de jabón no varía conforme se va inflando, tampoco varía la resistencia a ulteriores aumentos de la superficie y la presión interna está gobernada únicamente por la curvatura. La membrana de goma de un globo es diferente. Como es elástica, cuanto más se agranda la superficie, tanto mayor resistencia opone a seguir creciendo. La resistencia podemos atribuirla de nuevo a la tensión superficial, aunque ésta ya no proceda de



1. Fuerzas sobre un trozo de membrana en una pompa pequeña y en otra grande.

una simple atracción eléctrica entre moléculas. Tiene su origen en una malla reticular de moléculas flexibles que forman largas cadenas. Cuando la membrana se estira, las moléculas interconectadas se resisten y tratan de que la membrana recupere su tamaño original. Cuanto más se estira la membrana, más se resiste la malla.

La elasticidad de la goma complica mucho el estudio de la variación de la presión interna en el proceso de inflar un globo. Como en el caso de las pompas de jabón, la curvatura sigue influyendo, puesto que determina qué fracción de las fuerzas que actúan en los lados de cada porción de goma es radial. Pero en el globo, la fuerza en sí cambia de intensidad a causa de la elasticidad. Conforme se hincha el globo, la disminución de la curvatura tiende a reducir la presión, mientras que el aumento de tamaño tiende a elevarla.

Para ver cuál de estas dos tendencias se impone cuando se infla el globo, necesitamos un modelo que describa cómo se estira la goma. En 1986, Graham Read, de la Universidad a Distancia en Milton Keynes (Inglaterra), sugirió que el estiramiento puede compararse con la expansión de un resorte. Este ofrece una resistencia al estiramiento con una fuerza proporcional al grado de alargamiento. Por ejemplo, si estiramos un resorte hasta una longitud doble que la original, nos opondrá una fuerza que será doble que la primera, por lo que deberemos tirar dos veces más fuerte para mantener el alargamiento o aumentarlo levemente.

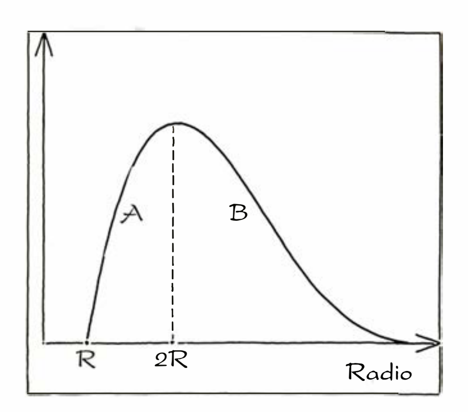
Con este modelo, Read pudo calcular la variación de la presión dentro de un globo esférico en función del radio del globo. En la figura 2 se presentan los resultados. (Recuérdese que la presión es en realidad la diferencia entre la interior y la exterior.) Según el cálculo, conforme el globo se agranda, la presión primero aumenta en la porción de la gráfica señalada con una *A*, alcanza un máximo y luego disminuye en el trozo señalado con una *B*. En *A* la variación está dominada por la resistencia de la goma al estiramiento. En *B* la variación la determina la disminución de la curvartura. El máximo corresponde al momento en que la curvatura toma la iniciativa y el globo empieza a actuar como si se tratara de una pompa de jabón.

Para seguir la curva, supongamos que nos disponemos a inflar un globo. De partida está fofo; nuestro primer soplido sirve para darle una forma esférica, sin tensar la goma. Sea *R* el radio en ese momento. La presión y el radio se representan por el punto más bajo de la curva en la zona *A*.

Cuando soplamos otra vez, el punto representativo de la gráfica trepa curva arriba: el globo se hincha y la presión aumenta hasta que el globo alcanza un estado de equilibrio. Como en el comportamiento del globo en *A* predomina la resistencia de la goma a estirarse, para seguir hinchando el globo hasta nuevos estados de equilibrio deberemos aumentar la presión de los soplidos sucesivos. Read descubrió que la presión de equilibrio máxima se alcanza cuando el radio es 2*R*. Cuando el radio es aún mayor (en *B*), cada soplido adicional lleva al globo a un estado de equilibrio con una presión más baja, de modo que inflarlo se va haciendo cada vez más fácil. Para insuflar más aire, seguiremos teniendo que exceder la presión de equilibrio, pero ésta va menguando paulatinamente.

Según el análisis de Read, la presión cae hasta que el globo se hace tan grande que carece de curvatura. En ese límite ideal, la tensión sería muy grande, pero las fuerzas ejercidas sobre los lados de cualquier trozo de globo no tendría componentes hacia dentro. Por supuesto, un globo real estallaría mucho antes de llegar a ese límite.

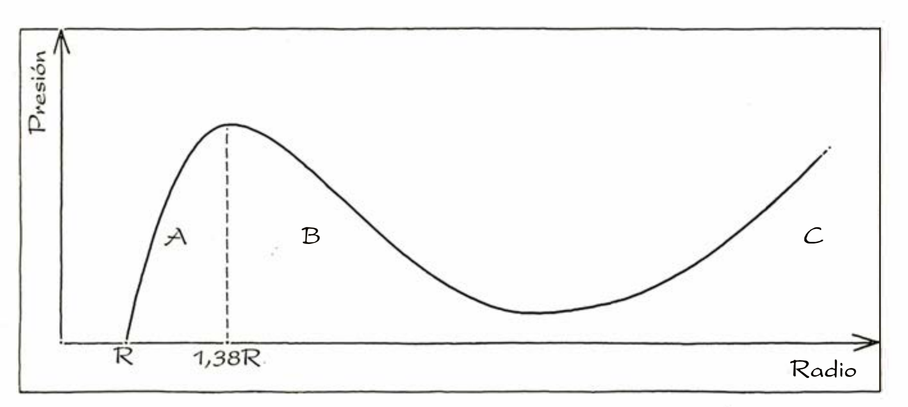
Otro estudio del inflado de globos lo publicaron en 1978 David R. Merritt y Frederick Weinhaus, ambos por entonces en la Universidad de Santa Clara. Para el estiramiento de la goma del globo emplearon un modelo más complicado, pero su gráfica de la presión en función del radio es similar a la de Read [*véase la figura 3*]. Aquí también la presión aumenta hasta un máximo y después disminuye. Calcularon que la presión máxima se presenta para un radio de 1,38 *R* aproximadamente. Observaron además que, si un globo se infla hasta un radio de varias veces *R*, la presión vuelve a aumentar en una zona que llamaremos *C*. El aumento de presión indica que, cuando la goma está fuertemente estirada, la resistencia a un estiramiento ulterior aumenta más rápidamente que la disminución de curvatura.



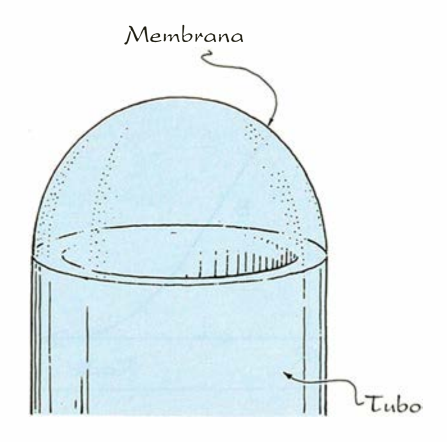
2. Variación de la presión al irse dilatando el globo.

En 1973, H. D. Crane, del Instituto de Investigación de Stanford, publicó otro estudio acerca de este tema. Crane se preguntó cómo se inflaría una membrana que estuviera unida a la abertura de un tubo en el cual pudiera controlarse la presión del aire. Este dispositivo difiere considerablemente de los anteriores. Cuando insuflamos aire a una pompa o a un globo, soplamos aire a una presión mayor que la existente, pero esa presión no la mantenemos sino un breve instante. En el dispositivo de Crane un regulador conectado a una fuente de aire comprimido mantiene la presión continuamente.

Supongamos que una película jabonosa cierre la boca del tubo. Recordemos con respecto a las pompas de jabón que la presión en su interior es proporcional a la curvatura. Antes de abrir el regulador, la película está plana; es decir, no tiene curvatura. A medida que aumenta la presión, la



3. Otro análisis: la goma se resiste a estiramientos muy fuertes.



4. Una membrana inflada en la boca de un tubo.

película se comba hacia fuera y con ello aumenta la curvatura. Cuando el radio de la película iguale al radio del tubo, la película será una semiesfera; la curvatura será entonces máxima, y en ese punto la presión que puede soportar la película alcanza un máximo. Si la presión aumenta un poco, la película tendrá que crecer hacia fuera, pero esta dilatación reduce la curvatura y con ello la resistencia a la presión de la película. Esta ya no será estable, sino que se irá agrandando sin control hasta estallar.

En la figura 5 se ilustra el comportamiento de la película jabonosa con una gráfica de la presión en función del volumen que encierra. Esa gráfica se asemeja a las anteriores, aunque en el eje horizontal se representa el volumen y no el radio. El crecimiento controlado de la película hasta hacerse semiesférica tiene lugar en *A*. El rápido aumento de tamaño a partir de la presión máxima está representado por la línea discontinua que se extiende horizontalmente desde el máximo. La curva en *B* muestra la presión que podría ser contrarrestada por la curvatura cuando la película es mayor que una semiesfera. La diferencia entre la curva y la línea discontinua es la presión que expande la película hacia fuera durante su dilatación incontrolada.

El análisis es similar cuando en la boca del tubo tenemos una membrana de goma en vez de la película jabonosa. Ahora bien, en este caso la gráfica de la presión en función del volumen presenta una zona *C* donde la curva crece por segunda vez. Esta zona *C* refleja la elasticidad de la membrana; es allá donde la resistencia al estiramiento comienza a aumentar más deprisa de lo que decrece la curvatura, tomando la iniciativa del control de la presión.

Volvamos a imaginar lo que ocurre al aumentar gradualmente la presión en el tubo. El punto representativo del estado de la membrana empieza subiendo por *A* hasta llegar a la cima. Si la presión aumenta un poco, la membrana se estirará de golpe porque su curvatura no puede soportar la nueva presión. Al igual que la película jabonosa, la membrana se agranda espectacularmente. Poco antes de llegar a la presión máxima, la membrana sólo presenta una leve concavidad respecto al tubo. Cuando se abre un poco más el regulador, la membrana se expande de repente hasta alcanzar un tamaño varias veces superior al inicial. Sin embargo, la expansión no prosigue incontroladamente, porque la membrana puede alcanzar otro estado de equilibrio en *C*.

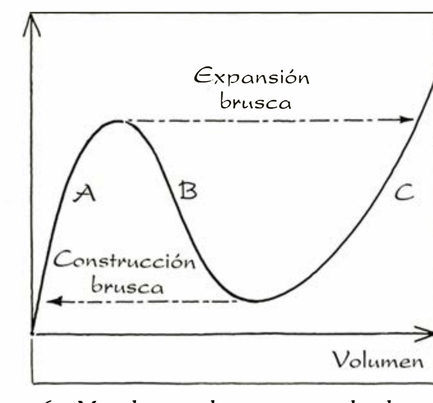
Imaginemos luego lo que ocurre si reducimos poco a poco la presión del aire. El punto representativo del estado de la membrana se desliza gradualmente curva abajo hasta llegar a lo más bajo, o sea, al valle entre *B* y *C*. Si entonces rebajamos la presión un poco más, la curvatura será excesiva para la nueva presión y la membrana se contraerá de repente hasta un nuevo estado de equilibrio en *A*. Esta contracción está representada por la línea discontinua horizontal que se extiende hacia la izquierda desde el valle.

Crane sugirió que tal vez nos encontráramos ante un caso de contracción brusca similar cuando soltamos un globo inflado que sale de estampida por la habitación. Supongamos que el globo esté inicialmente inflado hasta la zona *C*. A medida que se descarga el aire, la presión baja y el punto representativo correspondiente cae en el valle situado entre las zonas *B* y *C*. En ese lugar la curvatura del globo es abrumadora frente a la presión remanente y expulsa de golpe el resto del aire, lo cual comunica al globo un impulso final.

¿Cómo aplicar a un globo cilíndrico estas consideraciones acerca del tamaño y la presión? En 1984, E. Chater y J. W. Hutchinson publicaron un estudio que describía la expansión de un globo de este tipo. Al igual que en el caso de los globos esféricos, inflar un globo alargado resulta trabajoso al principio, pero luego se hace más fácil. Sin embargo, en contraste con lo que sucede con un globo esférico, la expansión queda al principio relegada

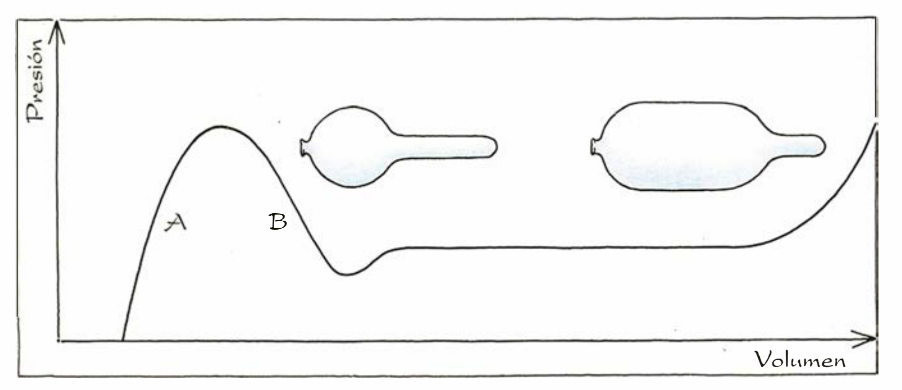
Presión
Expansión incontrolada
Estabilidad
A
B
Película semiesférica
Volumen

5. Película jabonosa en el tubo.





6. Membrana de goma en el tubo.



7. Evolución de la presión durante el inflado de un globo cilíndrico.

a una región, habitualmente el extremo contiguo a la boca.

Sigamos la gráfica de la presión en función del volumen obtenida por Chater y Hutchinson, representada en la figura 7, pero interpretando la mecánica del inflado de una manera algo distinta de como lo hicieron ellos. Cuando la presión se hace crecer por la zona *A* de la gráfica, el globo se estira radialmente formando una protuberancia de pequeño tamaño. Esa protuberancia empieza comportándose cual si fuera un globo esférico; es decir, una vez que la presión llega al máximo, la curvatura decreciente alrededor del perímetro de la protuberancia hace que la presión disminuya a través de la zona *B*. No obstante, cuando el estiramiento de la goma que forma la protuberancia es ya extremo y la presión se ve obligada a subir una segunda vez, acontece algo diferente. Exactamente cuando la presión vuelve a aumentar de nuevo, la protuberancia empieza a extenderse.

Veamos ahora qué pasa al soplar una vez más. El globo entonces tendrá que crecer por algún sitio. La protuberancia ya existente se resiste a expandirse más, dado el fuerte estiramiento que sufre la goma que la conforma. La mayor parte de la porción no inflada del globo también se resiste porque se encuentra en la zona *A*, donde predomina la elasticidad de la goma. Sin embargo, la región no inflada contigua a la protuberancia es, a buen seguro, más fácil de inflar gracias a la curvatura de la membrana. Esta, si bien es convexa en el perímetro de la protuberancia, presenta una pequeña zona cóncava allá donde se unen la protuberancia y la parte no inflada. En ese contorno cóncavo, las componentes de la tensión apuntan radialmente hacia fuera, por cuya razón favorecen que la superficie se estire cuando se insufla más aire al globo. A consecuencia de ello, el frente de la protuberancia avanza a lo largo del globo. Mientras el frente no llega aún al extremo del globo, la presión permanece constante.

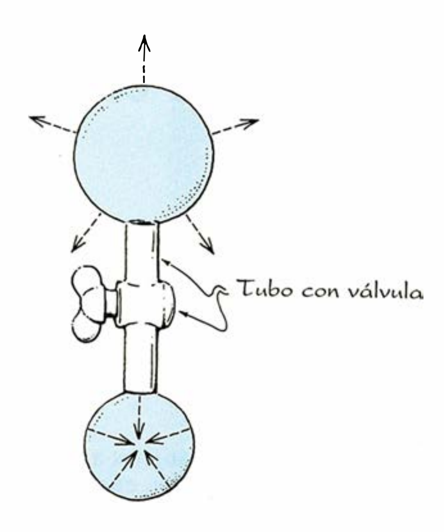
Si dejamos de soplar antes de haber hinchado todo el globo, podemos apretar con la mano una zona de la porción inflada hasta dividir en dos la protuberancia. Luego, empujemos las dos protuberancias resultantes (más pequeñas que la inicial) hacia los extremos del globo. Para ello también podemos retorcer el globo en el punto donde lo estrujemos. Cuando soltemos la zona apretada, ésta no se recuperará. Exactamente igual que la porción no inflada, no podrá volver a dilatarse salvo que insuflemos más aire. (Algunos ilusionistas artistas de variedades realizan esta maniobra con varios globos y los entrelazan unos con otros para crear increíbles figuras de fantasía.)

Regresemos ahora a los globos conectados por un tubo. Aquí también recurriremos al modelo de las pompas de jabón. Imaginemos dos pompas de diferente tamaño, conectadas por un tubo provisto de una válvula que al principio está cerrada para impedir el paso del aire entre las pompas. ¿Qué ocurre al abrirse la válvula? Como la pompa más pequeña está a más presión que la grande, la primera se desinflará conforme su aire fluya hacia la segunda, que adquirirá mayor tamaño. Pero cuanto más se encoja la pompa pequeña, tanto más vigorosamente impulsará el aire hacia la grande, ya que el desequilibrio de presiones va aumentando.

Si las pompas originales son del mismo tamaño, en principio podrían seguir así, pero sus estados son de equilibrio inestable. Si cualquiera de ellas sufre la más mínima perturbación, una se desinflará y la otra se inflará.

Sobre ese juego de conectar pompas de jabón escribió ya Charles V. Boys, científico británico afamado por sus trabajos de divulgación científica. No incluyó comentarios acerca del tamaño final de la pompa pequeña. Yo, tras haber leído algo en torno a los trabajos de Crane con películas jabonosas en tubos, estuve dándole vueltas a la cuestión. La presión en la pompa pequeña no crece constantemente conforme se contrae, sino que alcanza un máximo cuando ha disminuido hasta hacerse una semiesfera y disminuye desde ese momento, a medida que decrece la curvatura. Mientras tanto, la presión en la pompa grande debe también decrecer puesto que también decrece su curvatura. Según sean las condiciones iniciales, las pompas deben alcanzar ciertos estados de equilibrio en los que sus presiones coincidan. Entonces, la pompa pequeña será menor que una semiesfera, mas no plana.

¿Qué sucede cuando se sustituyen las pompas por globos inflados de diferente tamaño? La respuesta la dieron, en 1978, Weinhaus y William A. Barker, colaborador del primero en aquellas fechas, y Read independientemente en 1986. La respuesta depende de los estados iniciales de los globos al abrirse la válvula. Si ambos se encuentran en la zona *A* de sus gráficas de presión-radio, el mayor cederá aire al menor, hasta que los dos



8. Pompas interconectadas.

adquieran el mismo tamaño y la misma presión.

Ahora bien, si la cantidad de aire es superior a cierto valor crítico, los globos acabarán con una presión común, pero sus tamaños serán distintos. Uno estará en *A*; el otro, en *B*. Esa cantidad de aire crítica es la necesaria para inflar ambos globos a la presión máxima que hay entre *A* y *B*. Un globo podría empezar en *A* con una pequeña cantidad de aire, con tal que el otro empezase en *B* con aire suficiente para que la cantidad de aire total fuese mayor que la crítica; o bien, ambos podrían empezar en *B*. Por el contrario, si un globo empieza en *A* y el otro en *B*, y el volumen de aire total es inferior al crítico, los dos acabarán en *A* con el mismo tamaño y la misma presión.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SWITCHING PROPERTIES IN BUBBLES, BALLOONS, CAPILLARIES AND ALVEOLI. H. D. Crane en *Journal of Biomechanics*, vol. 6, n.° 4, págs. 411-422; 1973.

ON THE EQUILIBRIUM STATES OF INTERCONNECTED BUBBLES OR BALLOONS. F. Weinhaus y W. Barker en *American Journal of Physics*, vol. 46, n.° 10, págs. 978-982; octubre de 1978.

THE PRESSURE CURVE FOR A RUBBER BALLOON. David R. Merritt y Frederick Weinhaus en *American Journal of Physics*, vol. 46, n.° 10, págs. 976 y 977; octubre de 1978.

ON THE PROPAGATION OF BULGES AND BUCKLES. E. Chater y J. W. Hutchinson en *Journal of Applied Mechanics*, vol. 51, n.° 2, págs. 269-277; junio de 1984.

AN APPLICATION OF ELEMENTARY CALCULUS TO BALLOONS. Graham Read en *European Journal of Physics*, vol. 7, págs. 236-241; 1986.

Juegos de ordenador

Una caja de Pandora que contiene mentes, máquinas y hasta metafísica

A. K. Dewdney

¿Se hallan las mentes sujetas a las leyes de la física? ¿Qué *son*, en verdad, las leyes de la física?

—ROGER PENROSE,
The Emperor's New Mind

La inteligencia humana deja en pañales a la inteligencia artificial, puesto que saca partido de la física cuántica. Una tesis provocativa, por la que se inclina el distinguido físico-matemático Roger Penrose. A pesar de que la proposición no sea rigurosamente demostrable en el momento presente (como Penrose concede de buena gana), los intrigantes argumentos que expone en su libro, *The Emperor's New Mind*, han suscitado salutíferas dudas sobre los fundamentos filosóficos de la inteligencia artificial.

Presentaré dentro de poco los argumentos de Penrose, pero como esta sección dispone de brújula propia para trazar las cartas de aguas desconocidas, pondré en tela de juicio algunas de sus conclusiones y jugaré un poco con algunas de sus ideas. Me extenderé en particular sobre la cuestión "¿Cómo piensan las personas?", y plantearé si los seres humanos podrán llegar alguna vez a disponer de conocimiento suficiente para responderla. Si el universo tiene estructura infinita, es posible que los humanos no lleguen nunca a darle respuesta completa. Una regresión infinita de estructura, por otra parte, ofrece oportunidades computacionales de carácter excepcional.

Antes de saltar a tales materias, invito a los lectores a explorar conmigo los rincones y recovecos de *The Emperor's New Mind*. Visitaremos, primero, la renombrada sala china, para indagar si los programas "inteligentes" comprenden lo que están haciendo. Después, una breve visita a la piscina platónica nos pondrá frente a frente con una mesa de billar que saca partido de las colisiones elásticas de la física cuántica al objeto de calcular prácticamente lo que se quiera. Nos trasladaremos luego al laboratorio de Erwin Schrödinger, y nos interesaremos por la salud de su gato, con el fin de investigar la relación entre la física clásica y la mecánica cuántica. Y alcanzaremos, por fin, nuestro destino: una inteligencia infinita, capaz de resolver un problema que ningún ordenador finito ordinario podría jamás soñar en conquistar.

Una tarde, hace algunos años, viendo la televisión, Penrose se sintió atraído por un programa de la BBC en el que defensores de la inteligencia artificial sostuvieron una proclama muy osada, a saber: que los ordenadores, sin cambiar demasiado con respecto a los actuales, podrían algún día llegar a ser tan inteligentes como los humanos, y quién sabe si más. Tal afirmación irritó a Penrose. ¿Cómo podrían las complejidades de la inteligencia humana, y en especial la creatividad, ser fruto de los vaivenes de un algoritmo en el cerebro de un ordenador? La exageración de aquellas pretensiones fue el acicate que finalmente le indujo a escribir *The Emperor's New Mind*.

La exploración metódica de la teoría de computación llevó a Penrose a poner en entredicho una de las piedras angulares de las premisas filosóficas de la inteligencia artificial, el test de Turing. Muchos científicos informáticos aceptan que dicho test constituye vía válida para distinguir un programa inteligente de otro que no lo es. En el test de Turing, un interrogador humano va mecanografiando mensajes a dos sujetos ocultos: persona el uno; el otro, un ordenador programado para responder inteligentemente a las preguntas que se le hagan. Si, al cabo de un tiempo razonable, el interrogador no consiguiera señalar la diferencia entre las respuestas facilitadas por el humano y las proporcionadas por el ordenador, el programa habría superado el test de Turing.

Penrose aduce que el test de Turing tan sólo daría pruebas indirectas de la presunta inteligencia. Después de todo, lo que parece una entidad inteligente puede resultar mero remedo, al igual que un objeto y su imagen reflejada en el espejo ofrecen idéntica apariencia, siendo, en cambio, objetos distintos en otros aspectos. Penrose sostiene que un método directo de medición de inteligencia puede exigir mucho más que un simple test de Turing.

Para reforzar su argumento, Penrose da un paseo hasta la sala china, una peculiar variante del test de Turing inventada por el filósofo John R. Searle. Un interrogador humano permanece al otro lado de la puerta de una sala, en la que sólo pueden entrar y salir mensajes escritos en papel. El interrogador prepara una historia más algunas preguntas referentes a ella, las pasa a máquina y hace que las introduzcan en la sala. La variante: todos los mensajes, entrantes y salientes, están mecanografiados en caracteres chinos.

Para que la situación sea todavía más chocante, dentro de la habitación hay una persona encargada de ejecutar un programa que responde a la historia y contesta a las preguntas alusivas a la misma. Dicha persona desempeña exactamente el mismo papel que el equipo tangible de un ordenador. La tarea le resultaría al humano fastidiosa y aburrida, pero en cuanto aprendiera las reglas de ejecución, no tendría ninguna dificultad en realizarla. Para garantizar la completa ignorancia de la computadora humana, la persona en cuestión no sabe absolutamente nada de chino. A pesar de lo cual, la sala china parece comprender el cuento y responder inteligentemente a las preguntas.

Por lo que a Penrose se refiere, la moraleja del ejercicio es que "la mera ejecución de un algoritmo acertado *no* conlleva que haya tenido lugar comprensión alguna". Su conclusión es, sin duda, correcta si se dirige al aparato ejecutor, sea éste de carne y hueso, o de plástico y metal. Después de todo, el hecho de que el programa

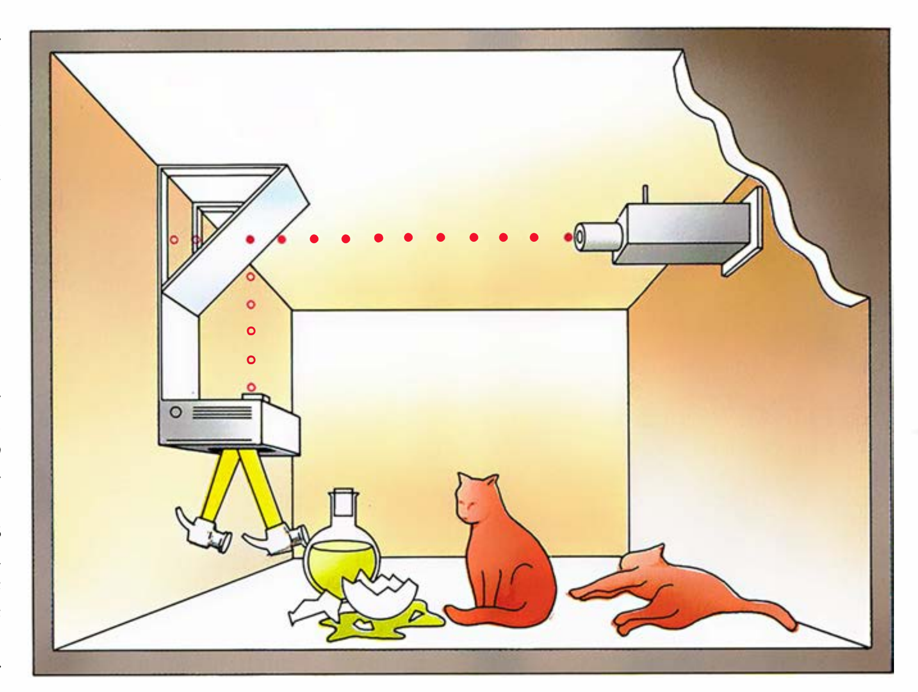
sea ejecutado por un humano o por un ordenador no establece, en principio, diferencia alguna en cuanto al resultado de la interacción del programa con el mundo exterior.

Pero, por la misma razón, el humano de la sala china tiene mucho de hombre de paja: nadie culparía a un programa de ordenador porque la maquinaria en que se ejecuta no alcanzase a comprender de qué trata el programa. Para hacer hincapié en esta tesis: nadie criticaría a una neurona por no comprender el significado de los trenes de impulsos que van y vienen a su través. Y lo dicho tanto valdría si la neurona estuviera ejecutando parte de un algoritmo, como si estuviera realizando algo mucho más sutil. Todo cuanto se proclame acerca de la inteligencia artificial habrá de referirse al algoritmo. Y ahí es donde Penrose vuelve a la carga.

El mundo de los algoritmos es sustancialmente el mundo de lo computable. Con palabras de Penrose, los algoritmos constituyen "una porción muy restringida y limitada de la matemática". Penrose cree (al igual que muchos matemáticos y que yo mismo) en una especie de realidad platónica habitada por objetos matemáticos. Tenemos indicación de la existencia independiente de tales objetos en nuestra absoluta incapacidad para cambiarlos. Se encuentran "ahí", lo mismo que las montañas y los océanos.

A modo de ejemplo, Penrose cita el conjunto de Mandelbrot. El conjunto de Mandelbrot no ha sido "inventado" por Benoit B. Mandelbrot, renombrado investigador titular de IBM, sino "descubierto" por él. Lo mismo que el planeta Neptuno, tal conjunto existía mucho antes de que ningún humano posase su mirada en él y se percatase de su importancia y significado. El conjunto de Mandelbrot lleva un importante mensaje para quienes lo imaginen criatura del ordenador. ¡No lo es! ¡El conjunto de Mandelbrot ni siquiera es computable! ¿Oigo rugidos de indignación? Estrictamente hablando, Penrose tiene razón.

El conjunto de Mandelbrot, aunque no es más que un hito en el mundo platónico, se encuentra ya un tanto distante de los exploradores algorítmicos. Quizá los lectores recuerden que los puntos del interior del conjunto pueden hallarse merced a un procedimiento iterativo: se eleva al cuadrado un número complejo c; seguidamente, el resultado, z_1, es elevado al cuadrado y sumado a c; este segundo resultado, z_2, se eleva al cuadrado y se suma a c, y así, una y otra vez. Si la sucesión de valores de tal modo producida nunca sale disparada hacia el infinito, el punto c pertenece al conjunto. Mas justo aquí se plantea un problema serio: ¿cuánto hay que esperar para decidir si la sucesión de valores se conserva acotada? La respuesta, en esencia, es: ¡eternamente!



1. El gato de Schrödinger. ¿Está vivo, muerto o ambas cosas?

En la práctica, lo que se hace es interrumpir el cómputo, llegado a cierto punto. Al proceder así, resulta inevitable incluir puntos que no pertenecen al conjunto, porque la sucesión construida a partir de ellos tarda demasiado en exhibir su divergencia. Las dificultades de computación que presenta el conjunto de Mandelbrot resultan nimias, comparadas con otras limitaciones de la aventura algorítmica. Por ejemplo, desde la concepción formalista, las propias matemáticas se consideran compuestas por sistemas axiomáticos. Establezcamos una modesta colección de axiomas, unas cuantas reglas de inferencia y ya estamos en el negocio. Un algoritmo conceptual llamado Algoritmo del Museo Británico genera todos los teoremas que son demostrables en el seno del sistema formal de axiomas y de reglas de inferencia. Desdichadamente, no todas las verdades del sistema figuran necesariamente entre los teoremas generados de esta forma.

Este descubrimiento, debido al matemático Kurt Gödel, echó por tierra toda esperanza de mecanización completa de las matemáticas. Penrose ofrece el famoso teorema de Gödel como prueba de que la inteligencia humana es capaz de trascender el método algorítmico: "...una consecuencia clara del argumento de Gödel [es] que la noción de verdad matemática no puede quedar encapsulada en ningún esquema formal". Pues, en tal caso, ¿cómo podría ser el propio teorema de Gödel resultado de un algoritmo?

Ignoro la respuesta de esta cuestión, pero no es la primera vez que la he visto planteada. Parece, sin embargo, que el teorema de Gödel podría derivarse de otros axiomas y reglas de inferencia, y, consiguientemente, sería productible por un algoritmo. El teorema podría no ser más que uno de una ristra interminable de metateoremas. Agradecería mucho que lectores doctos en la materia me enmendaran sobre este punto.

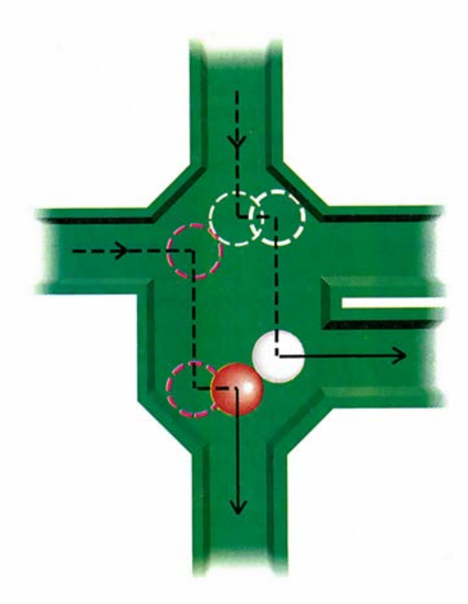
Sea cual fuere la opinión que se tenga sobre estas cuestiones, *The Emperor's New Mind* ataca las pretensiones de la inteligencia artificial en otro frente: la física de la computación. Penrose da a entender que el verdadero hogar de la computación reside más en el mundo tangible de la mecánica clásica que en el reino imponderable de la mecánica cuántica. El ordenador moderno es un sistema determinístico que, en su mayor parte, se limita sencillamente a ejecutar algoritmos. Con talante un tanto jocoso, Penrose toma una mesa de billar,

escenario de tantísimos encuentros mecano-clásicos, como marco conceptual adecuado para una computadora de molde clásico.

Reconfigurando el contorno, podríamos construir una mesa de billar donde las bolas desempeñasen el papel de portadoras de mensajes y sus interacciones actuasen como decisiones lógicas. La computadora-billar fue ideada, hace algunos años, por dos científicos informáticos, Edward Fredkin y Tommaso Toffoli, del Instituto de Tecnología de Massachusetts. El lector podrá apreciar la sencillez y potencia de una computadora-billar examinando el diagrama que vemos en la figura 2.

El diagrama muestra un dispositivo lógico. Dos canales de ingreso permiten el paso de bolas en movimiento a una cámara especial, provista de tres canales de regreso. Si solamente penetra una bola en la cámara desde cualquiera de los dos canales de acceso, saldrá de ella bien por el canal de regreso inferior, bien por el derecho superior. Sin embargo, si penetran en la cámara dos bolas al mismo tiempo, una de ellas saldrá por el canal derecho inferior. La presencia o ausencia de una bola en este concreto canal de salida señala la función lógica conocida como puerta Y. La salida es una bola si, y solamente si, penetran sendas bolas a la vez por cada uno de los canales de ingreso.

Es posible construir un ordenador utilizando tan sólo puertas de este tipo y de otro tipo más, a saber, una cámara en la cual sale una bola por un determinado canal, si y solamente si no entra una bola por otro. Los lectores encontrarán sin duda de su gusto intentar el diseño de tal cámara, para lo que han de tener presente que la empresa se facilita disponiendo de bolas adicionales.



2. Puerta Y
realizada con bolas de billar.

Todos apreciamos la tersura y clasicismo de movimientos de las bolas de billar. La bola posee, empero, otras cualidades deseables, a las que mal dedicamos un solo pensamiento. Por ejemplo, nadie ha tenido que preocuparse jamás por si las bolas estaban simultáneamente en dos lugares. La mecánica cuántica, en cambio, sí produce ansiedades de ese tipo. Sistemas cuánticos como el famoso experimento de las dos rendijas abren la posibilidad de que un fotón pueda hallarse en dos lugares al mismo tiempo [véase "Realidad del mundo cuántico", por Abner Shimony; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1988].

En breve, cuando los fotones pasan a través de una doble rendija, pueden considerarse como ondas que interfieren consigo mismas. Situando una pantalla tras las rendijas, aparece un patrón de interferencia, a menos que uno coloque un detector en cada rendija. En efecto, ¡el acto de observación obliga al fotón a decidir a través de qué rendija pasará! Tal fenómeno se denomina colapso del vector de estado. El experimento puede ampliarse a una observación que tenga lugar en uno de dos posibles puntos distantes entre sí un kilómetro (o un año-luz, si se quiere). La única forma de que el fotón pueda decidir a través de qué rendija pasará, afirman muchos físicos, es encontrándose, efectivamente, en ambos lugares al mismo tiempo.

¿En qué punto del continuo de escalas, desde la escala atómica a la galáctica, se convierten los sistemas cuánticos en sistemas clásicos? El dilema queda ilustrado por el famoso gato de Schrödinger. En este experimento conceptual, un científico nada temeroso de los activistas en pro de los derechos de los animales coloca un gato y un recipiente de gas tóxico en una sala que contiene un láser, un espejo semiplateado y un martillo.

Sellada la habitación, el láser emite un fotón hacia el espejo. Si el fotón atraviesa el espejo, el gato no sufre daño alguno. Pero, si el fotón se refleja, hace impacto en el detector, que activa el martillo; éste rompe en añicos la bombona que contiene el gas, y el gato muere. Es imposible saber desde el exterior de la habitación si el gato vive o muere.

En el mundo mecano-cuántico, los dos acontecimientos coexisten con carácter de realidades superpuestas. Pero en el mundo clásico, tan sólo puede acontecer uno u otro de ambos fenómenos. El vector de estado (y posiblemente el gato) han de colapsar. Penrose sugiere que la teoría actual no tiene forma de tratar la tierra de nadie comprendida entre la física clásica y la mecánica cuántica. La teoría está escindida en dos, cuando a gran escala debería aparecer de una pieza y sin costuras. Quizá la síntesis llegue desde un campo conocido por gravitación cuántica.

Volvamos ahora, por fin, a la mente humana. Para Penrose, la conciencia posee un ingrediente no algorítmico. A nivel cuántico pueden coexistir distintas alternativas. Un mismo estado cuántico podría consistir, en principio, en un gran número de actividades distintas y simultáneas. ¿Será el cerebro humano capaz de alguna forma de sacar partido de tal fenómeno? Difícilmente podría yo explorar esta fantástica posibilidad tan bien como lo hace Penrose. Lo mejor que pueden hacer los lectores que se sientan intrigados por esta idea es comprarse el libro.

Me sentí inspirado, sin embargo, para explorar una cuestión afín. ¿Podrían los seres humanos cuantificar su propia inteligencia en un universo cuya estructura prosiguiese indefinida y eternamente? Parece inconcebible que la estructura de la materia pueda tener fin, ya sea en forma de una partícula última y definitiva, o de una colección de tales partículas. Y con esto no entiendo solamente partículas, sino cualquier estructura subyacente a los fenómenos en cuestión, ya sea energética o informacional.

Se me antoja que la propia física puede ser empresa infinita, por la sencilla razón de que tan pronto es descubierta una estructura "última", el problema inmediato pasa a ser explicar la existencia de las leyes "últimas". En cualquier caso, yo preferiría vivir en un universo infinitamente estructurado. Pues, para empezar, nuestras mentes podrían ser mucho más potentes que si la estructura solamente tuviera punto final.

Los ordenadores se construyen de manera que la influencia de todo proceso físico que acontezca por debajo de cierta escala quede totalmente descartada. Es preciso proteger el algoritmo frente a "errores". Nuestros cerebros pueden o no hallarse estructurados de tal manera, como nos hace notar Penrose. Es muy posible que los acontecimientos físicos a nivel atómico desempeñen un papel importante en la formación de pensamientos.

No hay duda de que así sucede a nivel molecular: baste pensar en la influencia que las moléculas neurotransmisoras ejercen sobre el comportamiento de las neuronas. Además, es bien sabida la característica de la naturaleza para sacar partido de posibilidades físicas y aprovecharlas para el desarrollo de operaciones biológicas. Si las estructuras físicas se extienden hasta cierto nivel, ¿existen a priori razones para creer que el cerebro ha de quedar automáticamente excluido de su aprovechamiento?

¿Qué sucedería si el cerebro pudiese sacar partido de todos los niveles de estructura de un universo infinitamente estructurado? Para poner de manifiesto, de la forma más burda imaginable, cuáles serían las potenciales facultades de un cerebro infinito, he diseñado un ordenador infinito que saca partido de la estructura a todos los niveles. Para los fines de mi demostración, haré como si la estructura fuese de naturaleza clásica a todas las escalas.

Mi ordenador infinito [*véase la figura 3*] consiste, en esencia, en un cuadrado que contiene dos rectángulos y otros dos cuadrados menores. Una línea de entrada penetra en el cuadrado grande por la izquierda y pasa inmediatamente al primer rectángulo, el cual representa un dispositivo de procesado de señal al que llamaré módulo de sustitución. El módulo de sustitución envía una línea a cada uno de los dos cuadrados pequeños, así como al otro rectángulo, al que, en lo sucesivo, llamaremos módulo de mensajes.

La estructura entera del ordenador obedece a una regresión infinita. Cada uno de los dos cuadrados menores es duplicado exacto del cuadrado grande, aunque a escala mitad. En la propagación de una señal a través de las líneas y módulos de escala mitad, las distancias a recorrer son también mitad y, por ello, los módulos de sustitución y de mensajes operan a velocidad doble que los correspondientes de nivel inmediato superior.

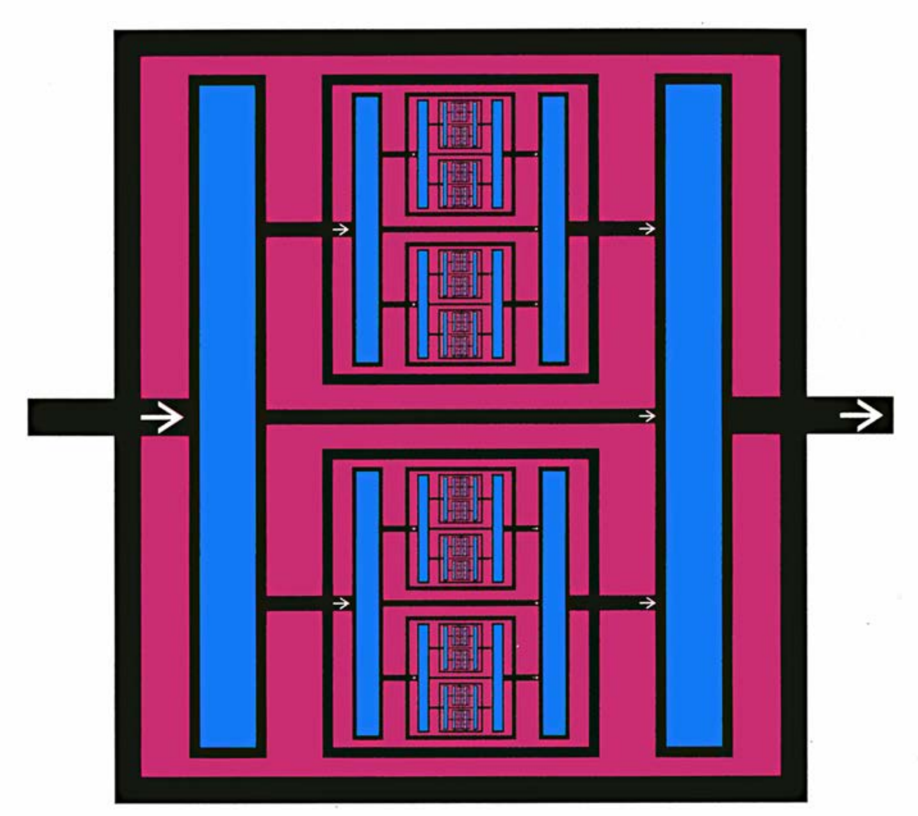
El ordenador infinito resuelve el famoso "problema de las palabras" inventado por el matemático Axel Thue. En este problema se dan dos palabras y un diccionario de sustituciones lícitas. ¿Será posible pasar de la primera a la segunda palabra efectuando tan sólo sustituciones? He aquí un ejemplo del problema: supongamos que la primera "palabra" es 100101110 y que la segunda sea 01011101110. ¿Podremos transformar la primera palabra en la segunda reemplazando 110 por 010, 111 por 10 y 001 por 100? El ejemplo ha sido elegido al azar y, deliberadamente, me abstengo de tratar de resolverlo.

Podría suceder que ninguna serie de sustituciones consiguiese transformar la primera palabra en la segunda. Por otra parte, cabe en lo posible que sí exista una secuencia de sustituciones que resuelva el problema. En el curso de tales sustituciones, pueden irse creando palabras intermedias muy largas. En eso estriba la dificultad. Lo mismo que sucede con ciertos puntos del conjunto de Mandelbrot, resulta imposible determinar efectivamente la respuesta. No existe algoritmo para el problema, ya que, por definición, todo algoritmo ha de tener fin. El peligro está en que el algoritmo pudiera concluir antes de haberse decidido la cuestión. Se dice, por este motivo, que el problema de Thue es indecidible. Ningún programa de ordenador puede resolver todos los casos particulares de este problema, ni siquiera en teoría.

Entra en escena el ordenador infinito. Se le proporciona al ordenador la palabra diana a través de la línea principal de entrada. Penetra en el primer módulo de sustitución en 1/4 de segundo. La palabra se transmite después por el módulo de sustitución a los dos módulos de sustitución del nivel siguiente. Pero esta transmisión requiere solamente un 1/8 de segundo. La transmisión a los niveles posteriores exige 1/16 de segundo, 1/32 de segundo, y así sucesivamente. El tiempo total para que todos los módulos de sustitución queden "cargados" con la palabra diana es, por consiguiente, de 1/2 segundo.

Seguidamente se alimenta al ordenador con las tres fórmulas de sustitución (o las que sean) por el mismo proceso y a idéntica velocidad. Esta vez, sin embargo, los diversos módulos de sustitución de los diferentes niveles se encuentran preprogramados para aceptar como propias solamente ciertas sustituciones de la secuencia, y están asimismo preprogramados para intentar siempre una sustitución en un lugar específico de una palabra procedente de un nivel superior. La relación del plan de distribución para efectuar las sustituciones y los lugares donde éstas deben producirse seguramente agotaría la paciencia del lector; la omitiré. Lo que no debería impedir a quienes disfruten con las excursiones infinitas tratar de imaginar cómo podría resolverse.

La computación comienza cuando se le envía al ordenador la primera palabra. El primer módulo de sustitución trata de efectuar sobre la palabra entrante la sustitución que le es propia, en el lugar que tiene asigna-



3. Un ordenador fractal resuelve el problema verbal de Thue.

do. Si no es posible efectuar la sustitución en el lugar requerido, el módulo de sustitución transmite la palabra al cuadrado inferior del nivel consecutivo; si tiene éxito en efectuar la sustitución, transmite la palabra transformada al cuadrado superior. En el caso de que la sustitución tenga éxito y de que la palabra recién producida coincida con la palabra diana almacenada en la memoria del módulo de sustitución, el módulo envía una señal especial al módulo de mensajes: "éxito".

Cada uno de los cuadrados de cada nivel funciona exactamente de esta manera. Como ya indiqué anteriormente, es posible distribuir las sustituciones (y los lugares donde intentarlas) por toda la computadora infinita, de modo tal que el problema siempre quede resuelto. La cuestión exige, a lo más, un segundo para quedar decidida en cualquier caso: medio segundo para que la computación descienda hasta los módulos infinitesimales, más un máximo de otro medio segundo para que el mensaje "éxito" alcance la línea principal de salida. De no haber una secuencia de sustitución, la inexistencia de mensaje después de transcurrido un segundo puede entenderse como respuesta negativa. Sin duda, los lectores encontrarán grata la reflexión sobre el ordenador infinito, al tiempo que sacarán partido de las muchas (quién sabe si infinitas) estructuras de su propio cerebro.

Parece que ha sido muchísimo el tiempo transcurrido desde que, en esta sección, presentamos el problema del Castor Afanoso, en octubre de 1984, a saber: si a una máquina de Turing no se le permiten más de *n* estados, ¿cuál es el número máximo de unos que puede producir tal máquina de Turing antes de acabar por detenerse? Las máquinas de Turing son dispositivos conceptuales que leen y escriben ceros y unos sobre una cinta. Para cada uno de los posibles estados en que puede encontrarse, una máquina de Turing tiene una respuesta bien determinada para cada símbolo que pueda leer en la porción de cinta que se encuentre examinando en ese momento. La respuesta especifica qué símbolo escribir y en qué dirección mover el cabezal de lectura/escritura antes de pasar al ciclo siguiente.

En el problema del Castor Afanoso, la máquina de Turing es el "castor". La cuestión es: ¿cuán afanosa podemos hacerla? El asunto está zanjado ya para máquinas de Turing de uno, dos, tres y cuatro estados. Antes de mi artículo de 1984, el más afanoso de los castores pentaestado conocidos producía 501 unos antes de detenerse. Entonces, uno de nuestros lectores, George Uhing, del Bronx, Nueva York, descubrió una máquina pentaestado que imprimía 1915 unos. Hasta hace muy poco, éste era la marca mundial de la especialidad.

Allen H. Brady, de la Universidad de Nevada en Reno, da cuenta de un castor nuevo y todavía más afanoso, descubierto por Heiner Marxen y Juergen Buntrock, de la Universidad Técnica de Berlín, en Alemania Federal. El castor de Marxen y Buntrock es casi cuatro veces más activo que el de Uhing. ¡Produce como salida 4098 unos y efectúa 47.176.870 ciclos antes de detenerse! ¿Puede ser más activo un castor pentaestado? Quizás alguno de nuestros lectores pueda descubrirlo.

En "Juegos de ordenador" de octubre pasado, proponía a los lectores un problema de Dennis Shasha, de la Universidad de Nueva York. Uno de los problemas del libro de Shasha [recién publicado en español con el título *Las intrigantes aventuras del Dr. Ecco*, Editorial Labor, Barcelona] pide proyectar una estación de investigación antártica que ha de tener 31 estancias. Ninguna de las salas puede tener más de cuatro puertas, y las salas deben estar dispuestas de modo que se pueda ir desde una cualquiera a otra sin pasar por más de seis puertas. Preguntaba yo si los lectores podrían idear una disposición arquitectónica capaz de acomodar más de 31 habitaciones.

Pasaron de cien los lectores que enviaron soluciones al problema de Shasha. Aunque muchos lograron nada menos que 53 salas, basándose en una disposición dendrítica, algunos, especialmente sagaces, observaron que no era necesario que los caminos pasasen a través de una sala central. De hecho, colocando dos árboles uno contra otro, compartiendo las "hojas", estos lectores lograron una arquitectura de 70 salas, todas en una misma planta. Eric Jordan y Eric Weeks, de Downers Grove, Illinois, dieron con un método más sagaz todavía, en el cual ciertas "salas-hoja" podían ser escindidas en dos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics. Roger Penrose. Oxford University Press, 1989.

Libros

Gen-ética, lexicografía, circuitos corticales y la cosmología del origen del universo

Antonio Prevosti, Luis Alonso, Elio García-Austt y Luis Mas

GENETHICS. THE CLASH BETWEEN THE NEW GENETICS AND HUMAN VALUES, por David Suzuki y Peter Knudtson. Harvard University Press. Cambridge, Massachusetts, 1989.

El rápido progreso técnico que se ha producido en las últimas décadas ha puesto de manifiesto la posición del hombre en la naturaleza como responsable de la evolución en nuestro planeta. Uno de los aspectos más relevantes de esta nueva situación ha surgido con los avances de los conocimientos de la genética, en particular al desarrollar técnicas para manipular los genes y cambiar las propiedades de los organismos a voluntad del investigador. Así, la ciencia en general, y la genética en particular, adquiere una dimensión nueva que va más allá del simple conocimiento, dentro del que hasta ahora parecía limitada. El título del libro de Suzuki y Knudtson expresa este hecho. Como dicen los autores en el prefacio, *Genethics* es una palabra nueva, obtenida por "recombinación" de "genetics" y "ethics", que capta la vinculación conceptual de esta ciencia y su nueva dimensión, la ética. En castellano, sin necesidad de manipularlo, el término genética puede entenderse en esta doble vertiente.

Sigue al prefacio una corta introducción, donde los autores expresan sus opiniones sobre el significado actual de la ciencia y de la tecnología para la sociedad humana. Analizan las limitaciones generales del conocimiento científico y de los investigadores actuales. La progresiva especialización de éstos, consecuencia de la proliferación de información, y la necesidad de publicar continuamente y con rapidez para promoverse en su carrera y seguir obteniendo subvenciones para trabajar, les impediría reflexionar sobre los resultados que obtienen y darse cuenta de su trascendencia social. También opinan que la mayor parte de las aplicaciones científicas no sirven a los mejores intereses de la humanidad, porque se utilizan principalmente para fines militares y para el lucro de la industria privada.

En mi opinión algunos de estos aspectos negativos son evidentes, pero no todos. La sensibilidad social de muchos científicos es considerable. Recordemos que la primera alerta sobre los peligros de la manipulación genética la dieron los mismos especialistas que trabajaban en ella. Por otra parte, a veces se produce un uso desaprensivo de las aplicaciones de la ciencia por las compañías privadas, debido al fin lucrativo que éstas tienen. Por ello, la vigilancia y la legislación sobre sus productos deben ser estrictas. No obstante, situar este peligro al mismo nivel que el de las aplicaciones militares me parece una deformación perniciosa de la realidad.

Los cuatro primeros capítulos resumen, de una manera bastante completa y asequible para el lector medio, los conocimientos de genética necesarios para valorar correctamente la problemática que el desarrollo de esta ciencia plantea a nuestra sociedad. Quizá la única crítica que cabe hacer a esta parte del libro es su excesiva fidelidad a la utilización de un símil coreográfico en la descripción de los mecanismos básicos de la herencia: la danza de la síntesis de las proteínas, de la replicación de los genes, de los cromosomas en la mitosis y en la meiosis, la danza darwiniana (de los genes en las poblaciones) y la nueva coreografía (del ADN recombinante). En algunos casos, por ejemplo al describir la mitosis y la meiosis, este símil es muy adecuado, pero en otros su utilización es forzada y, quizá, no contribuye a la claridad de la exposición.

Uno de los méritos de *Genethics* es que trata globalmente de las relaciones entre ética y genética, sin limitarse a las que surgen de las aplicaciones de la manipulación genética. En realidad, sólo en los capítulos 8, 9 y 11 se trata de ésta. El capítulo 8 considera la terapia génica, destacando la diferencia que hay entre la manipulación de las células somáticas, que sólo tiene consecuencias para el individuo tratado, y la intervención en las células germinales, que afecta a la descendencia y, por tanto, al patrimonio genético de la especie humana. Los autores aprueban la acción en las células somáticas y son optimistas sobre su futuro, considerándola una nueva vía para mejorar la prevención, el diagnóstico y el tratamiento de muchas enfermedades hereditarias, contra las cuales poco podía hacerse hasta ahora. En cambio, advierten con prudencia, no debe autorizarse la manipulación de las células germinales hasta que la sociedad haya tenido tiempo para reflexionar y debatir sobre sus posibles efectos.

En el capítulo 9 se analiza la vertiente más negativa de las aplicaciones de la ingeniería genética, su posible utilización para la guerra. En el 11, mediante un detallado análisis de las interacciones entre *Agrobacterium tumefaciens* y las plantas que parasita, discuten las consecuencias posibles de la transferencia de genes entre grupos taxonómicos distantes. También argumentan en favor de la prudencia, hasta que se conozca mejor la frecuencia en la naturaleza del paso de genes entre especies distantes y las consecuencias que esto tiene. En el resto de la obra se estudian otros aspectos de la genética de trascendencia para la sociedad. Siguiendo una pauta también utilizada en los capítulos ya comentados, centran la discusión en un ejemplo concreto, que sirve de paradigma para llegar a conclusiones generales. Esto facilita al lector la comprensión del problema planteado.

Las consecuencias de la exploración sistemática de los caracteres genéticos individuales, tal como se ha propuesto y realizado en algunos programas prácticos, se tratan en los capítulos 6 y 7. Pueden ser beneficiosas para la orientación profesional, para el tratamiento preventivo de enfer-

medades de manifestación tardía, para tomar medidas preventivas frente a predisposiciones hereditarias, etcétera. Mas, también, pueden tener graves consecuencias para los afectados, si el pronóstico genético es poco seguro, como sucede en muchos casos.

El control genético de los caracteres biológicos suele ser complejo. Depende de muchos genes que presentan intrincadas interacciones, entre sí y con factores ambientales. Por eso, a veces es muy difícil predecir qué consecuencias tendrá la presencia de un gen deletéreo o incluso de una anomalía cromosómica. Como paradigma de esta situación eligen la presencia de un cromosoma Y adicional, el llamado "cromosoma del crimen", que se ha encontrado en frecuencias elevadas en algunos grupos de reos de comportamiento muy violento, pero que se halla también en individuos de comportamiento normal. Detectar este cromosoma en la infancia no permite predecir si su portador será un criminal; en cambio, conocerlo puede afectar a su comportamiento y al de la sociedad respecto a él.

No sólo las radiaciones procedentes de la utilización de la energía atómica, de algunas industrias y de ciertas aplicaciones médicas pueden producir mutaciones y por tanto dañar el material genético. También tienen efectos semejantes numerosas sustancias químicas (pesticidas, productos químicos industriales, aditivos de los alimentos, materiales farmacéuticos, etcétera), que los autores de *Genethics* consideran de acción compleja e insidiosa. El capítulo 10 trata de la importancia de la conservación de nuestro patrimonio genético, frente a la acción destructora de estos agentes mutágenos. En el capítulo 12 demuestran que la variabilidad genética es un precioso recurso existente en nuestro planeta que debe conservarse, tomando como modelo la importancia que esta variabilidad posee para la mejora del maíz, especialmente para la obtención del maíz híbrido.

En el último capítulo se analiza la trascendencia del estudio del genoma humano: de su secuenciación total, de la localización de los genes en los cromosomas, de la aplicación a éstos de las técnicas de bandeo y de los mecanismos de transmisión de las enfermedades hereditarias. Destacan, como aspectos positivos de estos conocimientos, además de los indicados en el capítulo 8, su importancia para interpretar la evolución del hombre. No obstante, en general se extienden más en las consecuencias que consideran negativas. A veces, tienen claramente razón, como cuando se refieren al peligro de que se ponga excesiva confianza en los conocimientos genéticos, pues éstos no garantizan cordura en su aplicación, cuando van acompañados de una valoración falsa del dominio de los genes por el hombre. En cambio, la alerta que dan sobre el reduccionismo de los conocimientos genéticos actuales no conduce a una conclusión mesurada. Como dicen los autores, es muy probable que la solución de las cuestiones más desafiantes de la neurobiología y de otros campos de las ciencias de la vida requieran un enfoque no reduccionista. En cada nivel de complejidad, la interacción entre las partes de un sistema puede dar origen a propiedades emergentes. No obstante, creo conveniente señalar que, para entender cómo se originan y en qué consisten estas propiedades, seguramente es necesario tener un conocimiento previo de los constituyentes del sistema y de cómo se relacionan e interactúan. Rechazar la investigación genética por suponer, como apuntan los autores, que la complejidad de los sistemas biológicos nunca llegará a ser manejable, sería condenar el desarrollo científico basándose en una especulación.

Termina el libro con un epílogo, donde enuncian diez principios morales sobre las cuestiones éticas planteadas por la genética. Los nueve primeros resumen lo esencial de lo dicho en el resto del libro. Abogan por una posición responsable y consciente de la sociedad e incluyen varios de los puntos comentados favorablemente en esta recensión. El décimo merece un comentario aparte. Dice: "La búsqueda de principios éticos adecuados, que sirvan de guía en las difíciles decisiones personales y colectivas sobre las aplicaciones de la genética moderna, será un proceso sin fin. Para que tenga éxito, debe conducir más allá de los rígidos límites de la ciencia y del pensamiento filosófico occidentales, y llevarnos a territorios interculturales ricos, que abarquen otras vías de conocimiento." Estoy de acuerdo con que las fuentes de sabiduría de otras culturas pueden contribuir a un buen enfoque ético de la utilización de la genética. Además, las decisiones que deban tomarse han de ser responsabilidad y derecho de toda la humanidad, lo cual refuerza que no deban ajustarse, sólo, a patrones occidentales. No obstante, si no se desea detener la utilización de la ciencia, sino que siga sirviendo para mejorar las condiciones de vida de la sociedad humana, probablemente es necesario algo más. Deben incorporarse a la ética nuevos valores acordes con el papel que tiene el hombre como especie, en la evolución y en la determinación de su futuro y en el del planeta donde vive. El sentimiento de responsabilidad evolutiva como especie debería ser la base de estos nuevos valores éticos. (A. P.)

TERMINOLOGIE DES UNIVERSITÉS AU XIII^{e} SIÈCLE, por Olga Weijers. Edizioni dell'Ateneo; Roma, 1987. **DICCIONARIO LATÍN-CATALÁN Y CATALÁN-LATÍN**, por Elio Antonio de Nebrija y Gabriel Busa. Ed. facsímil; estudio preliminar de Germán Colón y Amadeu-J. Soberanas. Puvill Libros; Barcelona, 1987.

Los diccionarios vienen a ser, en muchos casos, la última instancia de apelación y, en otros, con mayor propiedad, el punto de arranque de cualquier exposición para saber de qué se habla. Tienen, en el segundo caso, una tácita aceptación, entre escolástica y gödeliana, de que los principios están dados por algo externo al propio sistema y no se prueban.

Aunque podamos desconocer su origen, las palabras son siempre creaciones humanas, que nacieron con un campo semántico determinado. Las distintas acepciones suelen ser ampliaciones, en el tiempo, del núcleo

significativo central. Y puesto que lo que conocemos, lo conocemos a través del lenguaje, los períodos de esplendor de la ciencia acostumbran ir asociados a momentos de especial fecundidad del idioma. La renovación de la ciencia en el siglo XII cristalizó en la fundación de las principales universidades europeas en la centuria siguiente, que trajeron un lenguaje nuevo, proceso que goza de una sólida historiografía desde los estudios de H. Denifle, seguidos por los de M. Grabmann, H. Rashdall y, más recientemente, por los de M. D. Chenu y P. Michaud-Quantin. Ese campo de investigación cuenta en España con un buen plantel de cultivadores, de los que sólo citaremos a E. Esperabé de Arteaga y a V. Beltrán de Heredia por lo que se refiere al caso particular de la Universidad de Salamanca; hay en curso estudios sobre el nivel de la ciencia en la universidad española bajomedieval y su expresión vernacular que prometen aclarar no pocas sombras de esa página incompleta de nuestra historia.

El libro de Olga Weijers, *Terminologie des Universités au XIII^e siècle*, se publicó en la colección "Lessico Intellettuale Europeo", que ha dedicado casi medio centenar de obras de lexicografía de diversa índole y de un amplio intervalo temporal: lenguaje moral, lógico y jurídico, métodos estadísticos aplicados y problemas lexicográficos o análisis de determinados conceptos, como "spiritus" o "species". Por su propia formación, Weijers es deudora de la corriente histórica que inicia Chenu con sus finos análisis de algunas instituciones medievales en el primer tercio de nuestro siglo y que culmina I. M. Congar con su estudio sobre el "magisterium".

Weijers divide la obra en tres partes, que corresponden, respectivamente, a las instituciones, las personas y la docencia. Por instituciones entiende las que denomina inmateriales (universidad, estudio general, facultad, nación, etcétera) y las concretas, como la cátedra. La universidad, que designa hoy la reunión de los edificios de las distintas facultades, así como la institución de docentes y discentes, más personal auxiliar, presididos por un rector, era en su origen lo que, en feísmo vitando, llamamos "colectivo" de alumnos, que se agrupaban por "naciones". Cada sede poseía, sin embargo, su propia organización y denominación. Más uniforme sería el "Studium generale" –de mayor afinidad a nuestra actual "universidad"–, que remitía a la enseñanza de distintas disciplinas, con varios profesores, a diferencia de las escuelas vigentes. La autora resume al principio de cada término la polisemia o fluctuación del mismo, luego aporta los testimonios en los que se basa para tejer su interpretación y, por último, la evolución semántica de la voz.

Las palabras evocan el trasfondo político y social del tiempo. Tal se aprecia paladinamente en la "licentia ubique docendi" ("potestad para enseñar en cualquier parte"); si la universidad la fundaba el Papa, en esa capacidad de poder enseñar más allá de cualquier frontera se traslucía el reconocimiento de la suprema autoridad del pontífice, por un lado, y, por otro, la autonomía o libertad de cátedra; algo que no ocurría si la universidad la establecía el rey, en los casos de Nápoles y España. Otros términos, desentrañados, nos revelan la organización académica, las becas, los salarios o los bienes del centro.

La vida diaria de la universidad se refleja a través del análisis lexicográfico de los términos referentes a docentes (maestro, lector, etc.) o alumnos (escolar, estudiante, bachiller, clérigo, etc.) y de las palabras que designan los cargos y tareas que se desempeñan en el funcionamiento de la institución, desde el rector o canciller hasta el fámulo o bedel, pasando por la organización colegial, verdadera instantánea de la extracción social de los alumnos. Y, por último, la clase propiamente dicha: qué se enseña, los exámenes, las huelgas, las vacaciones y la colación de grados.

Siete siglos después, las universidades europeas se plantean los mismos problemas de convalidación de títulos, intercambio de alumnos y profesores o de estrechez económica. La del XIII encontró el mecanismo de superar el anquilosamiento en la *Reformatio*, palabra que significaba –no el desbarajuste o el envilecimiento político que ha venido a expresar entre nosotros una norma de esa denominación–, sino una vuelta a sus orígenes. ¿Cuáles eran éstos? Ese es uno de los secretos del libro que el crítico no debe develar.

De la lexicografía medieval a la renacentista, y en su figura máxima: Elio Antonio de Nebrija (1444-1522). Mientras llega la biografía del hispalense científico que ponga al día la labor honesta de Armando Cotarelo, los gramáticos estarán en franca ventaja con los escritos de Francisco Rico sobre las *Introducciones latinas* y de Germán Colón y A. J. Soberanas sobre el *Diccionario latino-español*, rematado ahora con esta edición de la versión catalana del mismo de Gabriel Busa, objeto de la segunda parte de esta reseña.

"El volumen cuyo facsímile nos complacemos hoy en ofrecer al público es importante para el estudio del léxico de las lenguas hispánicas y de la filología romance en general. Trátase de una obra doble, estampada en Barcelona en el año 1507. La primera parte es la adaptación catalana del *Lexicon* o diccionario latino-español que Elio Antonio de Nebrija sacó a la luz en Salamanca en 1492, llevada a cabo por el fraile agustino Gabriel Busa. La sección segunda contiene la lista inversa catalano-latina, con la cual el citado fraile pretendió remedar el *Vocabulario español-latino* que el humanista andaluz había publicado con mucho éxito hacia 1495, también en Salamanca." (p. 11) El largo centenar de páginas que antecede al facsímil corresponde al estudio preliminar, que los autores dividen en dos partes de pareja extensión: aspectos léxicos y aspectos biográficos.

Colón-Soberanas forman un tándem que ha dedicado muchos años a Nebrija y su influencia, en España y fuera. A la hora de evidenciar su peso en una lengua peninsular ofrecen un punto de apoyo de extraordinario valor sobre el estado de los términos científicos, en España entera, a comienzos del XVI, con un Nebrija que ha publicado ya alguna obra de filosofía natural, pero todavía no la *Repetitio* sobre las medidas, ni las equivalencias castellanas del Dioscórides de Ruellius. Colón-Soberanas se preocupan, obviamente, por rastrear las fuentes de Busa en las intercalaciones o vocabularios que se agregaban en las ediciones barcelonesas de las *Introducciones latinas* y en acotar el esfuerzo traductor –a veces traidor– de Busa. Ponderan el sentido de esa traducción, que no era otro que poner al alcance del lector el sentido de los términos latinos, lenguaje de la ciencia y la cultura de entonces. Señalan la menor extensión del índice catalán-latín, sección en la que el autor no podía limitarse a transcribir en catalán la acepción castellana de la versión fuente.

Hubiera merecido la pena poner una cota a esa última observación, cierta por otra parte. El idioma dominante de la ciencia es el que impone sus reglas y caprichos. Si del latín pasamos al inglés, vehículo actual del saber, advertiremos que la traducción directa (del inglés al castellano) es más rica en lexemas que en el proceso inverso; por citar algunos: "espín", "quásar", "quark", "engrailed", "homeobox", "gauge", etcétera. Fenómeno que se dio, por lo que se refiere al predominio del alemán, en la ciencia del siglo XIX y principios del XX. Busa pierde muchos vocablos

por no existir una simetría absoluta entre la sucesión de voces castellanas y catalanas; pero, ¿qué decir de la introducción de la rapaz "duc", que distingue de "óliba"? Bien está, en los temas de historia natural, buscar apoyos *a posteriori*, como Laguna; éste, sin embargo, depende de Mattioli y, ambos, de Leoniceno. Nebrija debe bastante al movimiento naturalista de los humanistas italianos; quizás eso explica la abundancia de términos de sabor pliniano.

No olvidemos, empero, que esta obra es de lexicografía contrastativa, de gramática histórica *sensu lato*, y en esos dominios todo elogio se queda corto. Una objeción menor: a la redacción de la segunda parte, moteada de reminiscencias catalanistas, le falta cierta agilidad. "No obstante esto... Roca lo enriqueció con los nombres de muchas ciudades y de muchas islas, 'nuper inuentis', sacados de diversos autores que nombra..." (página 73). Agilidad que Nebrija nos enseñó a dar a un idioma de rudos balbuceos. (L. A.)

CORTICAL CIRCUITS. SYNAPTIC ORGANIZATION OF THE CEREBRAL CORTEX, STRUCTURE, FUNCTION AND THEORY, por Edward L. White. Birkhauser; Boston-Basilea, 1989.

Se trata de una revisión interesante de algo más de 150 páginas, descontando las referencias, que son muy completas, sobre los circuitos del neocórtex de los mamíferos, considerados desde el punto de vista anatómico y funcional. El libro está dividido en tres partes. La primera trata de los aspectos anatómicos y está escrita por el autor. La segunda parte se refiere a los aspectos funcionales y está desarrollada por Asaf Keller. La tercera parte, escrita por ambos, considera distintos hechos, teorías y modelos, y establece un concepto integrativo de los circuitos corticales. La lectura es relativamente fácil, pues cada capítulo y cada parte de un mismo capítulo acaban con un resumen claro.

El estudio de la anatomía se inicia con una exposición sobre la organización general de la corteza central. La descripción breve de las áreas corticales y de las características de las láminas es relativamente elemental, pero encuadra como una introducción necesaria a lo que sigue. Se destaca que las correlaciones entre la estructura y la función están sujetas a examen porque se ha establecido que una misma área citoarquitectónica puede contener representaciones múltiples de la periferia. Por otra parte, dice el autor que el análisis cuidadoso de la composición y de los tipos de conectividad de las láminas corticales son de un gran valor predictivo para el estudio de las relaciones sinápticas. Todas las áreas corticales poseen un gran número de elementos, dendritas y axones aferentes, eferentes e intracorticales, orientados verticalmente. No obstante, según su opinión no existen correlaciones evidentes con las columnas funcionales. Es interesante destacar la cautela que pone este autor, que ha contribuido notablemente al estudio anatómico de los circuitos corticales, en la discusión de este aspecto. Es común que muchos otros presenten esquemas hipotéticos y simplistas de circuitos corticales que no tienen ninguna utilidad.

El problema más importante en el estudio de los circuitos corticales consiste en la caracterización de las sinapsis. El autor sostiene que, para establecer la existencia de una sinapsis, no es suficiente la proximidad de dos elementos que pueda determinarse con la microscopía óptica. Este método ha ocasionado muchos errores conceptuales. Sólo es posible identificar las sinapsis por medio de la microscopía electrónica. Aun así, resulta difícil la individualización del elemento post-sináptico. La técnica más precisa consiste en el marcaje de ambos elementos pre- y post-sinápticos, técnica difícil que reduce bastante la posibilidad de individualizar las sinapsis. Al final de esta primera parte, el autor presenta un esquema de los circuitos corticales con las sinapsis que en su concepto están demostradas, con las que se sospechan y con las que se ignoran. De la observación de este esquema que indudablemente es muy completo, se deduce que aún existe mucho por conocer. El estudio de los circuitos continúa siendo un desafío para los anatomistas.

El estudio funcional realizado en la segunda parte se refiere fundamentalmente al análisis de los datos referentes a la corteza visual y somestésica. Las neuronas de las áreas sensoriales responden a estímulos que determinan las propiedades receptivas del campo. Estos estímulos poseen características específicas: tipo y número de receptores, propiedades físicas y modo de presentación, como son la dirección y el movimiento. Las neuronas de una columna funcional tienen propiedades receptivas similares, pero no necesariamente idénticas. Los estudios anatómicos y fisiológicos combinados no han establecido una correlación clara entre los tipos neuronales y su distribución laminar, por un lado, y las propiedades de los campos receptivos, por otro.

Las acciones excitatorias e inhibitorias forman conexiones muy específicas dentro de una misma columna, y entre una y otra columna. Estas interacciones son responsables de la conformación de los campos receptivos corticales. Existe una configuración general de la corteza –y también en otras regiones del sistema nervioso– constituida por la tríada que comprende una entrada común a neuronas excitatorias e inhibitorias, y las interacciones recíprocas entre estas neuronas.

Las neuronas gabaérgicas están presentes en una elevada proporción en la corteza, y es muy probable que todas las restantes células estén sujetas a su efecto inhibitorio. Esta inhibición gabaérgica desempeña un papel fundamental en la conformación de los campos receptivos, pues su abolición por medios farmacológicos los destruye o los modifica considerablemente.

En la tercera y última parte de esta obra se abordan algunos aspectos conceptuales, fundamentalmente en lo referente a los mecanismos del procesamiento cortical. Se han invocado dos mecanismos: el procesamiento jerárquico y el procesamiento en paralelo. El primero establece que los influjos talámicos terminan en neuronas "simples", cuyas características están determinadas por estos aferentes, estableciendo una jerarquía primaria. Las jerarquías superiores, que involucran neuronas progresivamente más "complejas", se establecen por convergencia de unidades "simples". Contrariamente, el procesamiento en paralelo se funda en que casi todas las neuronas corticales reciben influjos talámicos. Las distintas categorías de la sensación llegarían por diferentes canales específicos. Los autores son eclécticos y sostienen que ambos modos de procesamiento operan interactivamente. Más aún, consideran que constituyen una simplificación y que se han postulado como una abstracción para tratar de comprender el funcionamiento de los circuitos corticales. Considerados por separado ambos procesos son limitados y tienden a confundir.

A pesar de la extraordinaria complejidad de las conexiones corticales, sostienen que existen pruebas incontrovertibles de su especificidad. No obstante, sobre este cableado específico interviene una acción dinámica con formación y supresión constantes de circuitos, procurando así un alto grado de flexibilidad.

Los autores cierran la obra con una afirmación optimista, manifestando la esperanza de que, con los nuevos descubrimientos anatomofuncionales,

que sin duda se producirán, se podrán formular predicciones más significativas referentes a la organización sináptica y a la función de la corteza.

En conclusión, se trata de una obra importante, clara y precisa, cuya lectura es recomendable no sólo para quienes deseen iniciarse en el estudio de la corteza cerebral, sino también para aquellos que ya tienen experiencia sobre el tema, porque constituye una puesta al día y aporta nuevos conceptos interesantes. (E. G. A.)

THE EARLY UNIVERSE, de G. Börner. Springer Verlag; Berlín, 1988.

Dentro de la cosmología uno de los capítulos más apasionantes es el estudio de las etapas primitivas de nuestro universo. Desde un punto de vista científico no hace muchos años que puede estudiarse y, sin embargo, ya son muy numerosos los trabajos realizados, hasta el punto de que este libro pretende sólo presentar aquellos aspectos considerados como más seguros, dejando de lado los reputados todavía especulativos: gravedad cuántica, teorías de Kaluza-Klein y las supercuerdas. Ello excluye, por tanto, el estudio de los primerísimos instantes, por lo menos con cierto detalle.

Una característica importante en el estudio del inicio del universo es la confluencia en él de dos teorías hasta entonces bastante separadas: la relatividad general y la teoría cuántica de campos. Ello conlleva la dificultad de estar preparado en los dos aspectos, siendo cada uno de ellos de por sí bastante difícil de estudiar. Precisamente uno de los objetivos de este libro es el de introducir los dos aspectos, a fin de que los especialistas de uno de los campos puedan entender el problema visto desde el otro campo, aunque de un modo general puede ser estudiado por cualquier persona con un buen nivel de física (equivalente a licenciado). Este objetivo hace novedoso e interesante el programa que desarrolla el libro considerado como manual de texto.

El programa está dividido en tres partes bien diferenciadas. En la primera parte se introduce la relatividad general; rápidamente se pasa al estudio de las cosmologías de Friedmann-Robertson-Walker, consideradas ya como clásicas; se incluye la introducción al estudio de modelos anisótropos. Se extiende en la confrontación de la teoría con las observaciones que pueden o no validarla. En este aspecto, supera a muchos libros anteriores, por dos motivos: primero, está al día e incluye resultados de los últimos años y, segundo, presenta los resultados con el escepticismo necesario para dejar de manifiesto que hay muchos detalles que no están ni claros ni precisos. También se incluye en esta primera parte un estudio de la termodinámica del principio del universo dentro del cuadro de la teoría clásica de la gran explosión, a fin de introducir ya los primeros resultados sobre abundancia de los elementos y cotejarlos, asimismo, con las observaciones, cuestiones que serán profundizadas en la parte siguiente. Como el nivel es bastante alto, no todos los puntos están justificados y debe acudirse a la excelente bibliografía que se cita, si uno quiere entender todos los pasos.

En la segunda parte se abordan, dentro del cuadro de la teoría cuántica de campos, las teorías gauge asociadas al modelo estándar y los esquemas de gran unificación. Un tanto alejados de mi especialidad, reconozco que estos temas están bien presentados; pero, como el libro en una extensión normal no puede desarrollar cuantas cosas pretende el programa, aquí como en la parte anterior es necesario acudir a la bibliografía suplementaria para poder decir que uno ha entendido bien lo expuesto. Con ello quiero indicar que la lectura del libro debe enfocarse con la intención de ver, en una primera instancia, por dónde van los problemas y las soluciones, dejando de lado el rigor o la justificación de los resultados que se exponen y que debe buscarse fuera. Esta pérdida de rigor viene compensada por el hecho de reunir en un número de páginas razonable un conjunto de resultados apreciable que provienen de los dos campos citados.

Una vez introducida esta parte teórica, la aplica a exponer una teoría de partículas elementales en el universo primitivo, insistiendo en los aspectos más novedosos, como pueden ser: la masa de los neutrinos, el problema de los neutrinos solares, los axiones, los "muros de dominio" ("domain walls"), las cuerdas, los monopolos, los gravitinos y los fotinos. Hay un capítulo destinado a relacionar la teoría de gran unificación (GUT) con el equilibrio termodinámico, con consecuencias en la síntesis de bariones. El último capítulo de esta parte estudia los modelos cosmológicos inflacionarios, desde el nuevo hasta el viejo, vocabulario que llama viejo a un modelo que tiene sólo unos pocos años y que revela el ritmo de evolución de la investigación teórica, evolución permitida por el carácter difícilmente observable o medible de este universo primitivo.

La tercera y última parte va destinada a exponer el estado de un problema que, si bien no hace referencia a los primeros instantes, sí está relacionado con el universo primitivo, y además es muy importante: ¿cómo se formaron las galaxias? ¿En esta formación quedó al margen mucha materia que sería ahora la materia oscura? Para exponerlo se basa en las partes teóricas anteriores y en nuevas exposiciones más clásicas como puede ser la teoría newtoniana de las pequeñas fluctuaciones en fluidos, que luego amplía introduciendo la relatividad, imprescindible para las fluctuaciones de los primeros instantes. Quedan expuestas las circunstancias por las que se obtendrían, aparte de la formación de galaxias y vacíos, o bien materia oscura caliente o materia oscura templada, amén de las posibilidades de observación, difíciles, que dirimirían la cuestión. Dentro del cuadro de completitud del programa del libro, y con los defectos que ello conlleva ya señalados, esta parte culmina con una exposición bastante cabal sobre simulaciones numéricas de todos los problemas con partículas expuestos; a partir de ciertas condiciones iniciales, el teórico simula los millones de años necesarios para situarse en la época actual y ver si el resultado coincide o no con lo que observamos.

El límite de precisión en las observaciones actuales permite que diversas teorías expliquen igual de mal la situación real, ya que ninguna reproduce la situación presente. El aumento de las posibilidades de observación inminentes, sobre todo con el esperado telescopio espacial, podría ser aún más crítico para las citadas teorías y restringir la validez de bastantes de ellas. Con los nuevos datos podrán introducirse nuevas hipótesis que modificarían las teorías actuales, o incluso sería necesario postular nuevas teorías, seguramente más complicadas aunque también más realistas.

En resumen, considero acertado el objetivo del libro, concretado en el programa amplio del mismo, aunque excluya los aspectos más polémicos o menos comprobables actualmente por observación. Pero su lectura debe hacerse aceptando a priori que muchas cosas, para aprenderlas bien, exigirán un estudio bastante más detallado y una cantidad de tiempo adecuada. Si lo que se pretende es saber cuáles son los problemas que actualmente se estudian relacionados con el universo primitivo y cuáles son los resultados aceptados, así como los resultados todavía no alcanzados, y admitiendo que lo expuesto está debidamente contrastado, este es el libro que hay que leer. (L. M.)

Apuntes

La percepción del sonido, su tono, es una entidad subjetiva, que difiere de su frecuencia, el estímulo físico objetivo. Eso es lo que se creía; pero las mediciones de los campos magnéticos que emanan del cerebro expuesto a ese estímulo acaban de demostrar que el tono posee un correlato cerebral objetivo. Ahondando en ello, se llega a la conclusión de que el procesador del sonido en la corteza auditiva diverge del procesador que hay en la cóclea; aquél sería responsable del tono y éste de la frecuencia.

En el quehacer diario de la ciencia, los modelos o hipótesis preceden a la ley, que no suele enunciarse hasta que aquéllos han obtenido suficiente grado de confirmación y generalidad. La hipótesis de la pluma se avanzó, en geomorfología, hace ya 17 años, para explicar el vulcanismo de erupción basáltica en determinadas regiones continentales. El modelo se ha refinado y, hoy, establece que las plumas de materiales del manto caliente ascienden en columna y se difunden lateralmente produciendo vigorosos efectos dinámicos y térmicos, capaces de elevar en dos kilómetros la superficie. Las fuerzas de la gravedad fracturan el empinamiento con el tiempo; con la combinación de otros procesos, la hendidura puede convertirse en un océano en ciernes.

¿Por qué la lluvia amansa las olas? Se han propuesto varios mecanismos explicativos; el más verosímil de los cuales es el que lo atribuye a la producción, por las gotas, de turbulencia en el mar, que favorecería la disipación de las ondas. En experimentos de laboratorio se ha demostrado que, en ausencia de viento, la lluvia relaja las ondas gravitatorias de longitud de onda corta y contribuye a la apariencia cristalina del mar tras el paso de la tormenta.

No han transcurrido tres años desde que, en *Cell*, D. C. Page anunciara la identificación, en el cromosoma Y humano, del gen ZFY que determina el sexo masculino de los mamíferos, al que corresponde dirigir el desarrollo de la gónada fetal para formar los testículos. El gen determina una proteína ''en dedo de zinc'' (así llamada por la morfología digitada del polipéptido cuya unidad rodea un átomo de Zn que une dos cisteínas y dos histidinas). A ese éxito se le puso sordina, meses más tarde, con el descubrimiento de que tal gen no lo presentaban los marsupiales en el cromosoma Y; las últimas investigaciones descartan ya que el gen ZFY tenga un papel determinante en la formación de las gónadas masculinas, aunque puede cumplir otra misión en la espermatogénesis.

Los neurólogos vienen trabajando preferentemente con los invertebrados y los vertebrados inferiores en su esfuerzo por descubrir las relaciones entre el sistema nervioso y el comportamiento. La razón de ese proceder descansa en dos supuestos: se trataría de sistemas nerviosos muy sencillos y el comportamiento de esos animales sería estereotipado, es decir, la respuesta ante el estímulo siempre sería la misma. El primer supuesto ha perdido solidez ante la comprobación de que lo que se creía circuitos lineales eran en realidad redes complejas. El segundo parece correr la misma suerte: comienzan a menudear las pruebas de que los animales inferiores podrían gozar de la variabilidad y flexibilidad que caracterizan a la conducta de los vertebrados superiores.

Hideo Hayasaka y Sakae Takeuchi, físicos de la Universidad de Tohoku en Sendai, han lanzado una china contra el estanque tranquilo de la física newtoniana. Con suavidad oriental señalan que "los resultados experimentales obtenidos no encuentran explicación en el marco de las teorías vigentes". ¿A qué resultados aluden? A los derivados de un sencillo experimento que podrían repetir los alumnos de primer curso universitario: póngase en movimiento los giróscopos del laboratorio y mídase su peso. Cuando giren en el sentido de las agujas del reloj pesarán menos que cuando procedan en sentido antihorario.

El reciente terremoto de San Francisco ha vuelto a poner sobre el tapete la política de subvenciones: ¿debe primarse la aplicación del conocimiento adquirido a unos edificios y obras públicas más seguras o debe fomentarse en primer lugar la investigación básica sobre previsión de los seísmos? Como era de esperar, los geofísicos insisten en la necesidad de ahondar en el conocimiento de los fenómenos sísmicos, en tanto que los ingenieros reclaman más ayuda para su labor. Bueno sería que, por lo menos, se produjera ese debate entre nuestros climatólogos y nuestros ingenieros de caminos a propósito de las inundaciones periódicas que arrasan el levante español.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL A DEBATE

¿ES LA MENTE UN PROGRAMA INFORMATICO?, por John R. Searle
No faltan investigadores en inteligencia artificial convencidos de que la simulación informática de procesos mentales podría ser pensamiento. El autor aduce que los programas se limitan a manipular símbolos, sin referencia al significado, y son, pues, incapaces de comprensión.

¿PODRIA PENSAR UNA MAQUINA?, por Paul M. Churcland y Patricia Smith Churchland
Es posible que las máquinas que manipulan símbolos en obediencia a reglas no lleguen jamás a lograr inteligencia, pero –argumentan los autores– ello no supone un obstáculo absoluto. Bien pudiera suceder que tuvieran éxito sistemas de otro tipo, cuya organización física remede la cerebral.

MICROPLASMAS, por John J. Bollinger y David J. Wineland
Dos o más átomos, privados de sus electrones externos, atrapados en campos electromagnéticos y enfriados hasta temperaturas próximas al cero absoluto, crean estructuras que se comportan como líquidos y sólidos a la vez.

LA FISICA DE SUPERFICIES, por Rodolfo Miranda
Los avances recientes de la física de superficies están produciendo una avalancha de conocimientos, básicos y aplicados, sobre el comportamiento atómico en el universo en dos dimensiones de las superficies sólidas.

ADN Y ARN ANTISENTIDO, por Harold M. Weintraub
Las moléculas que se enlazan con ARN mensajero pueden desactivar los genes. Mientras se espera poder tratar algunas enfermedades con ellos, constituyen ya poderosas herramientas de investigación.

LOS CICLOS GLACIALES, por Wallace S. Broecker y George H. Denton
Los acontecimientos fundamentales que ponen en relación los cambios cíclicos de la órbita terrestre con el avance y regresión de los hielos son las profundas reorganizaciones del sistema océano-atmósfera.

QUIRALIDAD DEL UNIVERSO, por Roger A. Hegstrom y Dilip K. Kondepudi
De los electrones a las moléculas, desde el ADN hasta las plantas y el hombre, la naturaleza exhibe quiralidad u orientación simétrica, como las manos. ¿Cuándo domina una u otra?

ESTRES EN EL MUNDO SALVAJE, por Robert M. Sapolsky
Para comprender el estrés humano, nada mejor que estudiar el mecanismo hormonal subyacente al mismo en los papiones. ¿Por qué?

